

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ СПЕКТРУ
ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи ФТОІМ-23-1
Расулі Тимур Ш.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Расулі Тимуру Шах Валійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка пристрою для аналізу спектру джерел випромінювання

затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи принцип роботи Фур'є-спектрометра; основні складові аналізатора спектру; пакет прикладних програм для моделювання роботи приладу.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Види і характеристики спектрометрів. 2 Розробка та опис Фур'є-спектрометра для дослідження спектрів випромінювання джерел світла. 3 Підбір основних оптичних та оптико-механічних елементів. 4 Обґрунтування вибору елементів спектрометра.

5 Математично-програмне забезпечення Фур'є-спектрометра.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про різновиди спектрометрів	02.09.24–26.09.24	Виконано
2	Порівняння характеристик різних видів спектрометрів	30.09.24–18.10.24	Виконано
3	Розробка та моделювання оптичної схеми Фур'є-спектрометра	24.10.24–06.11.24	Виконано
4	Розробка прикладного математичного та програмного комплексу для роботи пристрою	12.11.24–22.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.24–20.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	02.01.25–06.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на плагіат	08.01.25–15.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	18.01.25–20.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.25–29.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 57 с., 28 рис., 7 табл.,
2 додатки, 16 джерел.

ДЗЕРКАЛО, ІНТЕРФЕРОГРАММА, ІНТЕРФЕРОМЕТР
МАЙКЕЛЬСОНА, ЛАЗЕР, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, СИГНАЛ, СПЕКТР,
ФОТОПРИЙМАЧ, ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТР.

Об'єкт дослідження — аналізатор спектру джерел випромінювання.

Мета роботи – розробка та дослідження принципу роботи Фур'є-спектрометра.

Метод дослідження – теоретичний з використанням ЕОМ.

У першій частині роботи розглянуто різні конструкції спектрометрів, їх технічні характеристики, визначено області застосування аналізаторів спектру.

Друга частина роботи включає в себе розробку оптичної схеми Фур'є-спектрометра, вивчено принцип його роботи, переваги та недоліки. Особливу увагу приділено конструктивним особливостям пристрою, підбору основних оптичних, оптико-механічних елементів, з обґрунтуванням їх вибору.

В третій частині представлено математично-програмне забезпечення Фур'є-спектрометра.

ABSTRACT

Explanatory note of the attestation work: 57 p., 28 fig., 7 table., 2 appeal, 16 sources.

FOURIER SPECTROMETER, FOURIER TRANSFORMATION, INTERFEROROGRAM, LASER, MIRROR, MICHELSON INTERFEROMETER, SIGNAL, SPECTRUM, PHOTO RECEIVER.

Object of investigation – Fourier spectrometer – spectrum analyzer of radiation sources.

The purpose of this work is the development and investigation of the principle of the Fourier spectrometer

The method of investigation is theoretical using a computer.

In the first part of the paper, various designs of spectrometers, their technical characteristics, and the applications of spectrum analyzers have been considered.

The second part of the work includes the development of the optical scheme of the Fourier spectrometer, the study of the principle of its work, advantages and disadvantages. Particular attention is paid to the selection of basic optical elements, with the justification of their choice and the structural features of the device and its main opto-mechanical elements.

The third part presents the mathematical software of the Fourier spectrometer.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Види і характеристики спектрометрів.....	9
1.1 Рентгено-флуоресцентний спектрометр.....	10
1.2 Атомно-емісійний спектрометр.....	12
1.3 ІЧ-спектрометр.....	14
1.4 Раманівській спектрометр.....	16
1.5 Атомно-абсорбційний спектрометр.....	17
1.6 Фур'є-спектрометр.....	19
2 Розробка та опис Фур'є-спектрометра для дослідження спектрів випромінювання джерел світла.....	26
2.1 Принцип дії Фур'є-спектрометра.....	29
2.2 Переваги та недоліки Фур'є-спектрометрів.....	30
2.3 Роздільна здатність Фур'є-спектрометра.....	32
2.4 Оптична схема. Отримання та обробка інтерферограмм.....	32
2.4.1 Отримання інтерферограми.....	33
2.4.2 Обробка інтерферограми.....	35
2.5 Основні оптичні елементи пристрою.....	36
2.5.1 Оптичні матеріали.....	36
2.5.2 Світлорозділювач.....	38
2.5.3 Дзеркала.....	40
2.5.4 Приймачі випромінювання.....	41
2.6 Механічні вузли та електронна система пристрою.....	44
3 Математично-програмне забезпечення Фур'є-спектрометра.....	47
3.1 Моделювання схеми.....	47
3.2 Математичне забезпечення Фур'є-спектрометра	48
Висновки.....	55
Перелік джерел посилань.....	56
Додаток А Параметри для моделювання інтерферометра Майкельсона....	58
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	59

ВСТУП

Розвиток лазерної техніки потребує пристроїв для дослідження та контролю спектрального складу джерел випромінювання. До таких пристроїв відносяться оптичні спектрометри, що призначені, як для дослідження спектрального складу речовини, так і спектрального складу випромінювання безперервних та імпульсних джерел світла.

В основі сучасних таких пристроїв є інтерференційна спектроскопія, в свою чергу, в основі якої лежить перетворення Фур'є. Широке поширення цього методу визначилося розвитком обчислювальної техніки, оскільки саме вона є необхідним елементом сучасного Фур'є-спектрометра, в основі якого застосовується – інтерферометр Майкельсона.

Фур'є-спектроскопія – метод оптичної спектроскопії, в якому спектр отримують в результаті фур'є-перетворення, так званих інтерферограм досліджуваного випромінювання. Інтерферограма залежить від оптичної різниці ходу двох променів і являє собою фур'є-образ спектра, тобто функцію розподілу енергії випромінювання за частотою (довжиною хвилі).

Основні завдання спектроскопії.

1. Ідентифікація сполук – встановлення будови.
2. Визначення якісного і кількісного складу сумішей неорганічних і органічних речовин.
3. Визначення енергетичних і геометричних характеристик атомів і молекул.
4. Вивчення внутрішньо- і міжмолекулярних взаємодій.
5. Дослідження кінетичних параметрів хімічних реакцій.
6. Дослідження спектрального складу речовин та джерел випромінювання.

Швидкий розвиток і широке застосування фур'є-спектроскопії зумовлені низкою переваг фур'є-спектрометра в порівнянні з дисперсійними приладами. Так званий виграш Фелжета (мультиплекс-фактор), виграш Жакино

(геометричний фактор), дозволяє зменшити час реєстрації спектрів і ставлення сигнал / шум, підвищити дозвіл і зменшити габарити приладу.

Наявність електронно-обчислювальних машин дозволяє крім обчислення спектра, проводити і інші операції з обробки отриманих експериментальних даних, здійснювати управління і контроль за роботою самого приладу.

Найбільше застосування фур'є-спекроскопія знайшла в тих дослідженнях, де інші методи малоефективні або зовсім непридатні (в основному, в інфрачервоній (ІЧ) області спектра). Наприклад, спектри в ближній ІЧ-області деяких планет були зареєстровані протягом декількох годин, а для реєстрації їх спектральним приладом з диспергируючим елементом було б потрібно декілька місяців. Малогабаритні фур'є-спектрометри були використані при дослідженні з космосу навколоземного простору і земної поверхні в середній ІЧ-області [1].

Тому розробка малогабаритних, з високою роздільною здатністю спектрометрів, є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Завданням даної кваліфікаційної роботи є:

- дослідження стану розвитку оптичних спектрометрів;
- підбір основних комплектуючих для реалізації пристрою;
- розробка та моделювання оптичної схеми Фур'є-спектрометра;
- теоретичні дослідження обробки інтерферограмм за допомогою сучасних математичних методів та пакетів розрахунків.

1 ВИДИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРІВ

Спектрометр (лат. Spectrum від лат. Spectare – дивитися і метр від грец. Μέτρον – міра, вимірювач) – оптичний прилад, який використовується в спектроскопічних дослідженнях для дослідження спектра, його кількісної обробки і подальшого аналізу за допомогою різних аналітичних методів.

Аналізований спектр виходить шляхом реєстрації флуоресценції після впливу на досліджувану речовину будь-яким випромінюванням (рентгенівським або лазерним випромінюванням, іскровим впливом та ін.). Зазвичай вимірюваними величинами є інтенсивність і енергія (довжина хвилі, частота) випромінювання, але можуть реєструватися і інші характеристики, наприклад, поляризаційний стан.

Спектр, що лежить в фокальній площині, можна розглядати оком за допомогою окуляра. Такий прилад називається спектроскопом. У спектрографах такий спектр реєструється на фотопластинку або інший багатоканальний приймач випромінювання. Якщо вихідну щілину і елемент, що відхиляє світло (призма або дифракційна решітка) переміщати один відносно одного, то отримуємо монохроматор, в якому використовуються різноманітні за принципом дії приймачі випромінювання.

За способом розкладання в спектр розрізняють наступні спектрометри: дифракційний, призмений і інтерференційний.

За принципом дії можна виділити наступні види спектрометрів:

- рентгено-флуоресцентний спектрометр;
- атомно-емісійний спектрометр;
- ІЧ-спектрометр;
- масс-спектрометр;
- атомно-абсорбційний спектрометр;
- Фур'є-спектрометр;
- раманівській спектрометр [2].

1.1 Рентгено-флуоресцентний спектрометр

Спектрометр даного типу призначений для визначення вмісту хімічних елементів в різних речовинах, які знаходяться в твердому, порошкоподібному або розчиненому стані, а також нанесених на поверхні і обложених на фільтри. З його допомогою можна визначити вміст заліза, золота, дорогоцінних металів, кальцію, сірки, калію, йоду, цинку, фосфору, хлору, проаналізувати ґрунт, воду і мінерали.

Області застосування:

- металургія;
- хімічна і гірська промисловість;
- геологія і мінералогія;
- машинобудування і інженерна діагностика двигунів;
- золотодобування;
- переробка рідкісних і дорогоцінних металів;
- нафтовидобуток;
- транспортування і переробка нафтопродуктів;
- екологія і сільське господарство;
- харчова промисловість;
- мистецтвознавча, криміналістична і судово-медична експертиза.

В даних спектрометрах (рис. 1.1) випромінювання рентгенівської трубки збуджує атоми досліджуваного речовини. При цьому виникає вторинне флуоресцентне випромінювання, яке потрапляє на диспергуючий елемент – кристал-аналізатор. Відбившись від нього, випромінювання реєструється детектором. Кристал-аналізатор і детектор переміщуються за допомогою прецизійного гоніометра, який управляється з комп'ютера. Кожному положенню гоніометра відповідає певна довжина хвилі вторинного випромінювання. При зміні кута падіння випромінювання на детектор, в нього потрапляють різні спектральні лінії, які відбиваються від кристала.

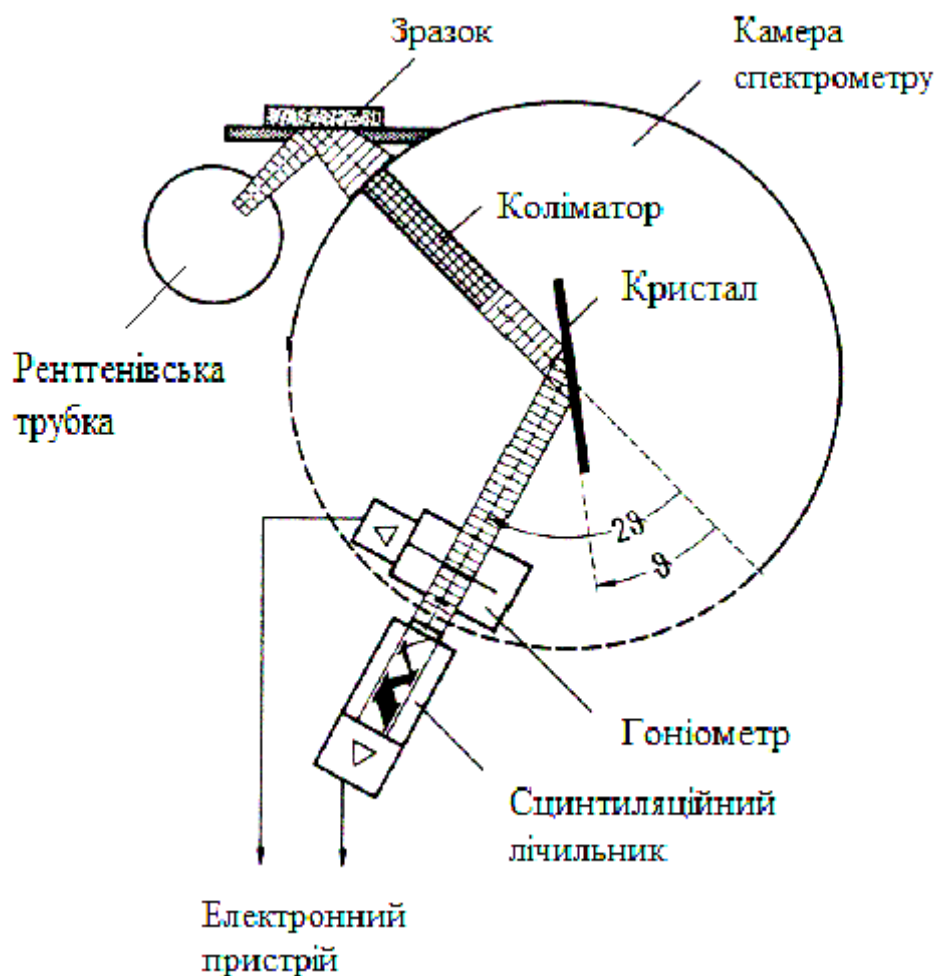


Рисунок 1.1 – Принципова схема рентгенофлуоресцентного спектрометра

Інтенсивність спектральних ліній говорить про кількісний вміст того чи іншого елемента. Концентрація розраховується шляхом порівняння з відомими значеннями стандартних зразків (наявність самих зразків при цьому не потрібно).

Для поліпшення результатів і визначення легких елементів таких як натрій, магній, алюміній, кремній, фосфор, сірка використовується вакуумна відкачка повітря або продування камери гелієм. Це дозволяє мінімізувати вплив атмосфери на одержувані результати. Крім того, на якість результатів впливає пробопідготовка досліджуваних матеріалів до тестів. Якщо досліджується тверда речовина, то його поверхню необхідно зачистити і

видалити бруд. Якщо досліджувана речовина – порошок, то його необхідно спресувати в таблетку, особливо в разі тесту на легкі елементи [3].

1.2 Атомно-емісійний спектрометр

Атомно-емісійний спектральний аналіз – це сукупність методів елементного аналізу, заснований на вивченні спектрів випускання вільних атомів і іонів у газовій фазі. Зазвичай емісійні спектри реєструють в найбільш зручною оптичної області довжин хвиль від 200 нм до 1000 нм.

Атомно-емісійна спектрометрія (АЕС) – спосіб визначення елементного складу речовини по оптичних спектрах випромінювання атомів і іонів аналізованої проби, які порушуються в джерелах світла. Як джерела світла для атомно-емісійного аналізу використовують полум'я пальника або різні види плазми, включаючи плазму електричної іскри або дуги, плазму лазерної іскри, індуктивно-пов'язану плазму, тліючий розряд та ін. АЕС – найпоширеніший експресний високочутливий метод ідентифікації та кількісного визначення елементів домішок в газоподібних, рідких і твердих речовинах, в тому числі і в високочистих.

Області застосування:

- металургія: аналіз складу металів і сплавів;
- гірничодобувна промисловість: дослідження геологічних зразків і мінеральної сировини;
- екологія: аналіз води і ґрунту;
- техніка: аналіз моторних масел, технічних рідин на домішки металів;
- біологічні та медичні дослідження.

Принцип дії атомно-емісійного спектрометра досить простий. Він заснований на тому, що атоми кожного елемента можуть випромінювати світло певних довжин хвиль – спектральні лінії, причому ці довжини хвиль різні для різних елементів. Для того щоб атоми почали випромінювати світло,

їх необхідно порушити: нагріванням, електричним розрядом, лазером або яким-небудь іншим способом. Чим більше атомів даного елемента присутньо в аналізованому зразку, тим яскравіше буде випромінювання відповідної довжини хвилі. На рис. 1.2 наведена функціональна схема атомно-емісійного спектрометра.

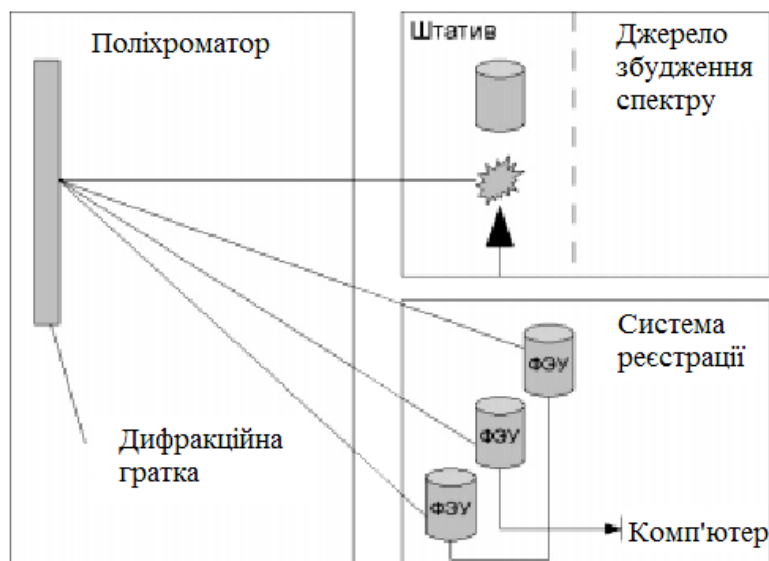


Рисунок 1.2 – Функціональна схема атомно-емісійного спектрометра

Він складається з наступних основних частин:

- штатив, в який встановлюється аналізуєма проба з джерелом збудження спектру – пристроєм, який змушує атоми проби випромінювати світло;
- поліхроматор, який розкладає випромінювання проби в спектр і дозволяє розділити випромінювання різних атомів, тобто виділити спектральні лінії аналізованих елементів;
- приймачі випромінювання (наприклад, фотоелектронні помножувачі) з системою реєстрації, які перетворюють світло в електричний сигнал, реєструють його і передають в комп'ютер;

– комп'ютер, який обчислює концентрації аналізованих елементів і керує всіма вузлами приладу.

Інтенсивність спектральної лінії аналізованого елемента, крім концентрації аналізованого елемента, залежить від великої кількості різних факторів. З цієї причини розрахувати теоретично зв'язок між інтенсивністю лінії і концентрацією відповідного елемента неможливо. Ось чому для проведення аналізу необхідні стандартні зразки, близькі за складом до аналізованої проби. Попередньо ці стандартні зразки експонуються (пропалюються) на приладі. За результатами цих пропалювань для кожного аналізованого елемента будується градуїований графік, тобто залежність інтенсивності спектральної лінії елемента від його концентрації. Згодом, під час проведення аналізу проб, за цими градуїованими графіками і проводиться перерахунок виміряних інтенсивностей в концентрації.

Переваги методу [4]:

- безконтактність;
- можливість одночасного визначення великого числа елементів;
- висока точність;
- низькі межі виявлення;
- простота пробопідготовки;
- низька собівартість.

1.3 ІЧ-спектрометр

ІЧ-спектроскопія – один з неруйнуючих аналітичних методів дослідження різних матеріалів. Цей метод використовується у фізиці твердого тіла, фізичної хімії, органічної і неорганічної хімії, біохімії та ін.

Області застосування:

– хімія і нафтохімія, якісний і кількісний аналіз сировини, проміжних і кінцевих продуктів синтезу. Аналіз палив: ефіри, спирти, ароматика, октанове число. Фракційний і структурно-груповий аналіз нафтопродуктів;

- хімія полімерів, склад кополімерів. Синтетичні каучуки: склад, структурні характеристики. Аналіз модифікуючих добавок: пластифікатори, антиоксиданти;
- фармацевтична промисловість: визначення дійсності субстанцій по ІЧ-стандартам, контроль якості лікарських форм і сировини;
- газовий аналіз: аналіз багатоконпонентних газових сумішей, контроль якості продукції газової промисловості, аналіз складу природного газу;
- електронна промисловість: контроль якості напівпровідникового кремнію і параметрів напівпровідникових структур. Аналіз складу технологічних газів;
- харчова та парфумерна промисловість, експресний контроль сировини та готової продукції: вміст білків, клітковини, жиру, вологи;
- екологічний контроль: контроль нафтопродуктів у воді та ґрунті, контроль атмосферного повітря, повітря робочої зони і викидів промислових підприємств;
- криміналістика: ідентифікація природних речовин і синтетичних матеріалів в мікропроб і мікрокількостях.

Метод ІЧ-спектроскопії заснований на тому, що при опроміненні речовини немонохроматичним інфрачервоним випромінюванням відбувається збудження коливальних і електронних ступенів свободи – через це відбувається поглинання падаючого випромінювання на частотах, відповідних різниці енергій коливальних і електронних рівнів. В спектрі пропускання або відбиття зразка, що опромінюється, з'являються особливості, що дозволяють судити про характерні частотні коливання молекул, кристала і їх електронних властивостях. Спектральні характеристики (положення максимумів смуг, їх півширина, інтенсивність) залежать від мас складових речовини атомів, геометричної будови, особливостей міжатомних сил, розподілу заряду та ін.

Основні переваги ІЧ-спектрометрів [5]:

- висока чутливість;
- експресність;

- автоматизація вимірювань;
- простота експлуатації;
- модульна конструкція.

1.4 Раманівський спектрометр

Раманівська спектроскопія (спектроскопія комбінаційного розсіювання) – вид спектроскопії, в основі якої лежить здатність досліджуваних систем (молекул) до непружного (раманівське, або комбінаційне) розсіювання монохроматичного світла.

Застосування раманівської спектроскопії:

- біологічна і медична діагностика (дослідження мікроорганізмів в клітинах; виявлення ракових захворювань на молекулярному рівні, кардіологічна діагностика (атеросклероз судин));
- фармацевтика (аналіз таблеток, розчинів і гелів, контроль стану ліків: чистота і якість);
- полімерні і хімічні процеси (контроль процесу полімеризації, прогноз морфологічних властивостей полімерів, аналіз хімічного складу);
- вивчення навколишнього середовища (виявлення забруднювачів у воді, ідентифікація та аналіз осаду у воді);
- сільськогосподарська і харчова промисловості;
- геологія і мінералогія.

Принцип дії раманівського спектрометра (рис. 1.3) полягає в тому, що через зразок досліджуваної речовини пропускають промінь з певною довжиною хвилі, який при контакті зі зразком розсіюється. Отримані промені за допомогою лінзи збираються в один пучок і пропускаються через світлофільтр, що відокремлює слабкі (0,001 % інтенсивності) раманівські промені від більш інтенсивних (99,999 %) релеевських. «Чисті» раманівські промені посилюються і направляються на детектор, який фіксує частоту їх коливання.

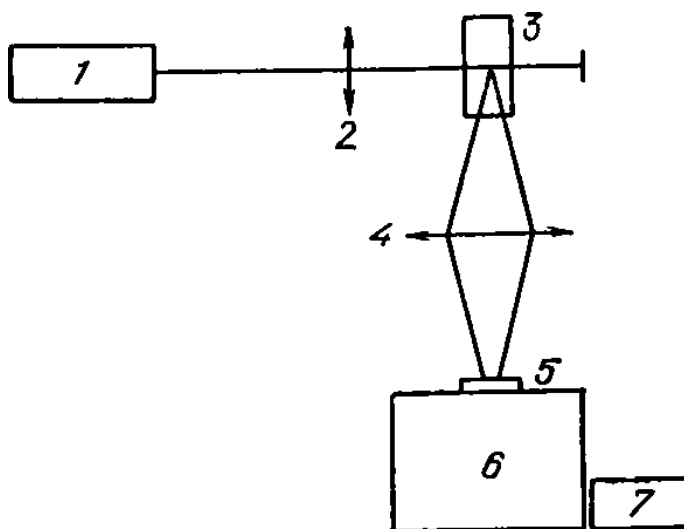


Рисунок 1.3 – Блок-схема установки для реєстрації спектрів

Раманівський спектрометр складається з наступних частин: 1 – лазер, 2 – лінза, що фокусує, 3 – кювета з досліджуваним зразком, 4 – конденсор, 5 – вхідна щілина, 6 – монохроматор, 7 – фотопомножувач або багатоканальний аналізатор.

1.5 Атомно-абсорбційний спектрометр

Атомно-абсорбційна спектрометрія – метод кількісного елементного аналізу по атомних спектрах поглинання (абсорбції). Через шар атомних парів проби, одержуваних за допомогою атомізатора, пропускають випромінювання в діапазоні від 190 нм до 850 нм. В результаті поглинання квантів світла атоми переходять в порушений енергетичний стан. Цим переходам в атомних спектрах відповідають так звані резонансні лінії, характерні для даного елемента. Відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера, мірою концентрації елемента служить оптична щільність:

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (1.1)$$

де I_0 і I – інтенсивності випромінювання від джерела відповідно до і після проходження через поглинаючий шар [1].

Атомно-абсорбційний спектрометр – прецизійний пристрій, що забезпечує відтворюваність умов вимірювань, автоматичне введення проб і реєстрацію результатів вимірювання [4]. Схема атомно-абсорбційного спектрометра зображена на рис. 1.4.

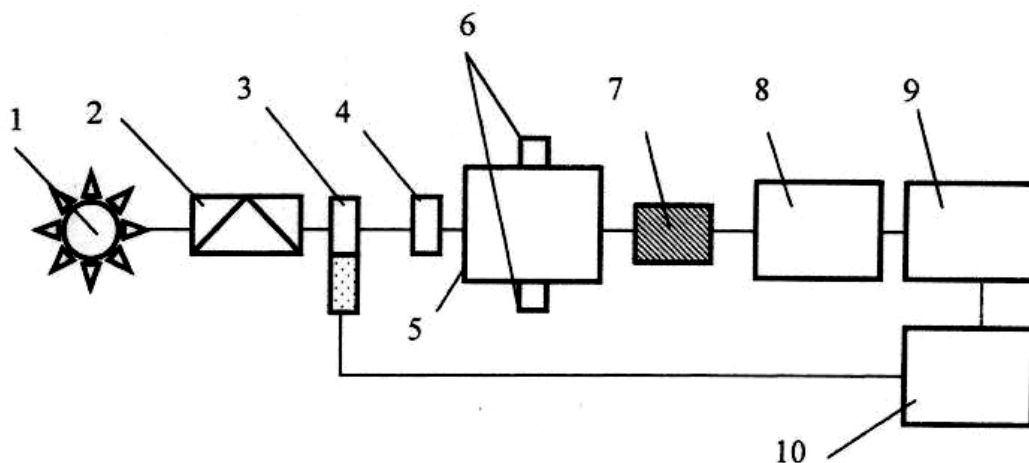


Рисунок 1.4 – Схема атомно-абсорбційного спектрометра

Спектрометр містить оптично пов'язані елементи: джерело випромінювання 1 з довжиною хвилі, відповідної резонансному поглинанню елемента, зміст якого в пробі вимірюється; поляризатор 2, оптомодулятор 3, фазову пластину 4 і атомізатор 5, розташований в магнітному полі, створюваному магнітами 6; пристрій перетворення випромінювання 7, монохроматор 8 і приймач випромінювання 9; а також систему реєстрації та обробки сигналу 10, електрично пов'язану з приймачем випромінювання і синхронізувати з оптомодулятором.

Області застосування:

- клінічні аналізи: аналіз металів в біологічних рідинах;
- екологічний аналіз: контроль навколишнього середовища;
- контроль лікарських препаратів;

- промисловість;
- гірнична справа.

Джерелом лінійного випромінювання в спектрометрах найчастіше служать одноелементні лампи з порожнистим катодом, які заповнюються неоном. Для визначення деяких легколетких елементів (Cd, Zn, Se, Ti і ін.) Зручніше користуватися високочастотними безелектродними лампами.

Також в вимірювальних приладах для експериментальних робіт використовують лазери. Так як лазери досить інтенсивні, щоб перевести атоми на більш високі енергетичні рівні, вони дозволяють виробляти атомну абсорбцію і атомні вимірювання флюоресценції в єдиному приладі. Незручність цих вузькосмугових джерел в тому, що за один раз можна виміряти тільки один елемент.

Для монохроматизації випромінювання використовують призми або дифракційні решітки (при цьому досягають дозволу від 0,04 нм до 0,4 нм) [6].

Переваги атомно-абсорбційного аналізу [7]:

- простота;
- висока селективність;
- малий вплив складу проби на результати аналізу.

Недоліки атомно-абсорбційного аналізу:

- неможливість одночасного визначення декількох елементів при використанні лінійчатих джерел випромінювання;
- необхідність переведення проб в розчин.

1.6 Фур'є - спектрометр

Фур'є-спектрометр – це інтерферометр Майкельсона, який освітлюється досліджуваним випромінюванням, одне з дзеркал переміщається з постійною швидкістю, а отримана на виході крива залежності відліку фотоприймального пристрою від різниці ходу променів в плечах інтерферометра, піддається фур'є-аналізу і тим самим перетворюється в розподіл інтенсивності по

частотах. У деяких випадках така складна методика виявляється ефективнішою, ніж прямий аналіз спектра [3]. Схема Фур'є-спектрометра представлена на рис. 1.5.

Фур'є-спектроскопія є ефективним методом вивчення коливальних спектрів речовин.

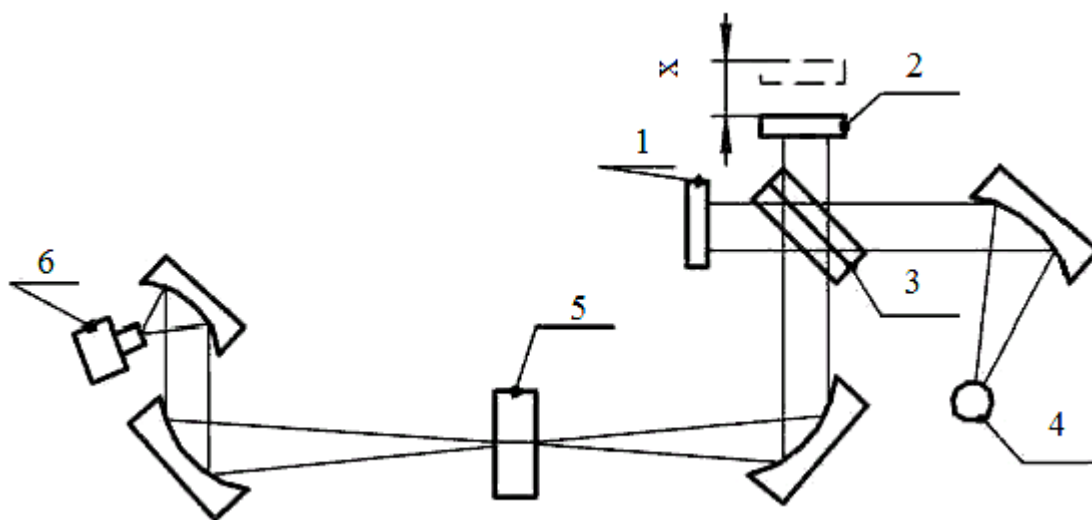


Рисунок 1.5 – Оптична схема Фур'є-спектрометра

Основні складові Фур'є-спектрометра: 1 – нерухоме дзеркало інтерферометра, 2 – рухливе дзеркало, 3 – світлороздільна пластина, 4 – джерело випромінювання, 5 – досліджуваний зразок; 6 – детектор випромінювання.

Області застосування:

- проведення досліджень в ІЧ області;
- Фур'є-спектроскопія забезпечила істотне просування в дослідженні коливально-обертальних спектрів молекулярних газів;
- газовий аналіз, в першу чергу аналіз складу атмосфери, як Землі, так і інших планет.

Приклади Фур'є-спектрометрів.

1. Лабораторний інфрачервоний Фур'є-спектрометр серії ФСМ (модифікації ФСМ 1201, ФСМ 1202 (рис. 1.6)). Призначений для якісного і кількісного аналізу твердих, рідких і газоподібних проб і контролю якості продукції по ІЧ-спектрам в хімічній, нафтохімічній, фармацевтичній, харчовій і парфумерній промисловості, здійснення екологічного контролю, криміналістичної та інших видів експертиз.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд спектрометра ФСМ 1202

Основні технічні характеристики спектрометра ФСМ 1202 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики спектрометра ФСМ 1202

Технічний параметр	Значення
Робоча область спектру, см^{-1}	400 – 7000
Спектральна роздільна здатність, см^{-1}	0,5
Абсолютна похибка градуювання шкали хвильових чисел не більше, см^{-1}	$\pm 0,1$
Відхилення лінії 100 % пропускання від номінального значення (1950 – 2050 см^{-1} , роздільна здатність 4 см^{-1} , 20 сканів), не більше, %	$\pm 0,5$

Продовження таблиці 1.1

Технічний параметр	Значення
Середнє квадратичне відхилення ліній 100 % пропускання (1950 – 2050 cm^{-1} , роздільна здатність 4 cm^{-1} , 20 сканів), не більше, %	0,025
Рівень позитивного і негативного псевдо розсіювання світла, не більше, %	$\pm 0,25$
Габаритні розміри, мм	520×370×250
Розмір кюветного відділення, мм	150×190×170
Маса, кг	32
Споживаєма потужність, Вт	60
Живлення приладу	220 (–33/+22) В, 50 $\pm 0,5$ Гц

2. Фур'є-спектрометр IRAffinity з ІЧ-мікроскопом AIM-8800 (рис. 1.7).

Даний спектрометр призначений для вирішення широкого кола дослідницьких і прикладних питань. За допомогою керамічного джерела випромінювання високої яскравості і термостабілізованого детектора забезпечується висока чутливість приладу. Цей прилад володіє найвищим відношення сигнал / шум і максимальною роздільною здатністю. В таблиці 1.2 наведені основні технічні характеристики.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд приладу ІЧ-Фур'є спектрометра IRAffinity

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики Фур'є-спектрометра IRAffinity з ІЧ-мікроскопом AIM-8800

Технічний параметр	Значення
Спектральний діапазон, cm^{-1}	7800 – 350
Оптична схема	однопроменева
Джерела випромінювання	високотемпературне керамічне джерело, галогенна лампа
Світлорозділювач	пластина з покриттям з германію
Інтерферометр	тип – Майкельсона, з кутом падіння 30°
Детектор	високочутливий термостабілізований детектор DLATGS
Роздільна здатність, cm^{-1}	0,5; 1; 2; 4; 8 або 16
Співвідношення сигнал / шум, більше	30000:1
Розміри кюветного відділення, мм	200×230×170
Габаритні розміри, мм	514×606×273
Вага, кг	35

3. Фур'є-спектрометр FT/IR-6700 (рис. 1.8). Призначений для вимірювання спектрів пропускання або відбивання досліджуваних об'єктів. Галузі використання: академічні дослідження, хімія та матеріалознавство, фармацевтика. Технічні характеристики приведені в таблиці 1.3.



Рисунок 1.8 - Загальний вигляд спектрометра FT/IR-6700

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики спектрометра FT/IR-6700

Технічний параметр	Значення
Спектральний діапазон, см^{-1}	7800 – 350
Точність по довжині хвилі, не гірше см^{-1}	$\pm 0,01$
Джерела випромінювання	високоінтенсивне керамічне джерело; додатково: галогенні лампи, ртутна лампа з водяним охолодженням
Світлорозділювач	пластина з покриттям з германію
Інтерферометр	тип – Майкельсона з кутом падіння 28° ; кубічна конструкція з кутовим дзеркалом
Детектор	стандартно: DLATGS (с контролем температури на ефекті Пельтьє); додатково: W-MCT, M-MCT, N-MCT, Si, InSb, InGaAs, PAS, Si
Роздільна здатність, см^{-1}	0,25; 0,07 (додатково)
Співвідношення сигнал/шум, більше	30000:1
Розміри кюветного відділення, мм	200×260×185
Габаритні розміри, мм	600×670
Вага, кг	56

4. Фур'є-спектрометр Agilent Cary 630 FTIR (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд спектрометра Agilent Cary 630 FTIR

Призначений для роботи в ближній і середній ІЧ-області. В основі покладено твердотільний лазер, з постійно вирівнюючою системою. Спектрофотометр досить чутливий, швидко видає як якісні, так і кількісні

результати, і досить надійний, має можливість витримувати жорсткі умови експлуатації без тривалого попереднього налаштування. Характеристики даного виду спектрометрів зазначені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики Фур'є-спектрометра Agilent Cary 630 FTIR

Технічний параметр	Значення
Тип інтерферометра	45° інтерферометр Майкельсона
Корпус спектрометру	герметичний
Інтерфейс спектрометру	USB2
Спектральний діапазон, см^{-1}	середній ІЧ-діапазон 6300 – 350 ближній ІЧ-діапазон 5100 – 600
Спектральна роздільна здатність, см^{-1} , менше	2
Похибка, см^{-1} , менше	0,05 см^{-1} (ASTM 1921)
Відтворюваність довжин хвиль, см^{-1} , менше	0,005 (ASTM 1921)
Програмне забезпечення	Agilent MicroLab, Automated IQ/OQ, 21 CFR Part 11, Resolution Pro – для складного аналізу
Габаритні розміри, мм	160×310×130
Вага, кг	3,8

В даній частині, було розглянуто та проаналізовано існуючі оптичні спектрометри, котрі відрізняються принципом дії, конструкцією та призначенням.

Особлива увага приділялась вивченню Фур'є-спектрометрів:

- проаналізовано та вивчено їх технічні характеристики;
- визначено області застосування аналізаторів спектру даного типу;
- розглянуто їх різні конструкції, котрі мають попит на сьогоднішній день.

2 РОЗРОБКА ТА ОПИС ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Найбільш поширені типи спектрометрів – це спектрометри з диспергируючим елементом, які здатні розподіляти випромінювання з різними довжинами хвиль в просторі. Прикладом таких елементів є дифракційні решітки і призми. Спрощена схема спектрометра з напівпрозорою дифракційною решіткою зображена на рис. 2.1.

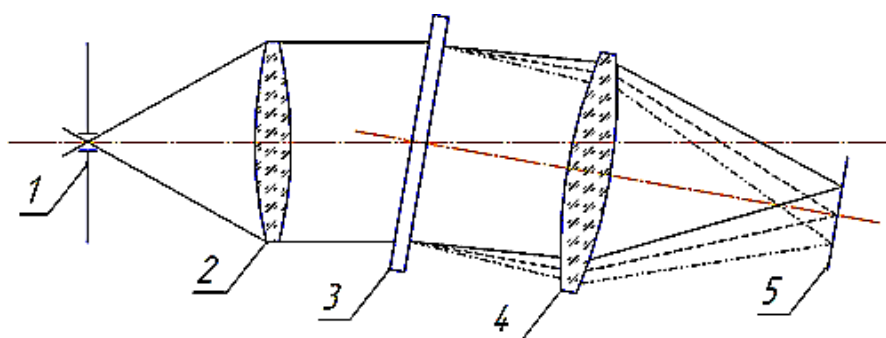


Рисунок 2.1 – Спектрометр з напівпрозорою дифракційною решіткою

Досліджуване випромінювання проходить через вхідну щілину 1, перетворюється об'єктивом 2 в паралельний пучок світла, який падає на дифракційну решітку 3. Решітка виробляє просторове розділення цього пучка – випромінювання з різними довжинами хвиль починає поширюватися під різними кутами. Фокуруюча лінза 4 формує з паралельних пучків зображення в площині 5, яке може реєструватися фотоприймачем.

Ці види спектрометрів відносно прості, але у них є свої недоліки. Одним з параметрів, що впливає на спектральний дозвіл спектрометра, є ширина щілини – чим вона менша, тим краще дозвіл. Однак при зменшенні розмірів щілини падає освітленість фотоприймача, через що ускладнюється отримання спектрів. Так як світло розподіляється по площині зображення, то освітленість зображення падає.

Призми, хоч і прості у виготовленні і використанні, не здатні забезпечувати високий спектральний дозвіл. Ще один їх недолік – вони можуть працювати тільки в певному діапазоні хвиль, що визначається матеріалом призми. Звичайні стекла не здатні пропускати випромінювання з довжиною хвилі більше 3 – 4 мкм.

Дифракційні решітки складніше у виготовленні, але забезпечують набагато краще спектральний дозвіл. Віддзеркалюючі дифракційні решітки можуть використовуватися в широкому діапазоні довжин хвиль – від ультрафіолетового випромінювання до далекого ІЧ. Один з недоліків дифракційних решіток – вони дають кілька різних порядків спектра, які можуть спотворювати інтерферограму. Для їх усунення доводиться використовувати світлофільтри, що обмежують спектр випромінювання на вході або виході спектрометра.

Для реєстрації спектра в площині зображення спектрометра встановлюють багатоелементні фотоприймачі, які дозволяють дуже швидко аналізувати весь спектр випромінювання. Для дослідження випромінювання довжиною більш 1,2 мкм потрібні приймачі з матеріалів, наприклад германію, арсеніду галію-індію, або навіть лінійки мікроболометрів. Такі багатоелементні приймачі випускають лише кілька компаній в світі, вони дуже дорогі і важкодоступні.

Для реєстрації спектрів можна використовувати і більш дешеві одноелементні фотоприймачі (фотодіоди, болометри), але в такому випадку сканування зображення повинно бути механічним – шляхом переміщення одного з вузлів спектрометра. Це помітно збільшує час отримання спектрограми і може знижувати точність вимірювання абсолютних величин довжин хвиль.

У Фур'є-спектрометрах використовується зовсім інший принцип роботи – він заснований на явищі інтерференції.

В основі оптичної схеми типового Фур'є-спектрометра лежить схема інтерферометра Майкельсона. Спектрометр з перетворенням Фур'є, являє

собою пристрій для спостереження інтерференційних картин при накладенні двох хвиль, отриманих з однієї вихідної світлової хвилі шляхом розподілу амплітуди. Падаюча світлова хвиля інтенсивності I_0 ділиться на дві або більш парціальних хвиль, які проходять різні оптичні шляхи і потім знову перекриваються на виході інтерферометра. Оскільки всі парціальні хвилі виходять з одного і того ж джерела, вони когерентні, доки максимальна різниця ходу не перевищить довжину когерентності. Результуюча амплітуда хвилі, що пройшла, є суперпозицією всіх парціальних хвиль і залежить від амплітуд, і фаз цих хвиль. Сумарна амплітуда істотно залежить від довжини хвилі λ . Схема інтерферометра Майкельсона представлена на рис. 2.2.

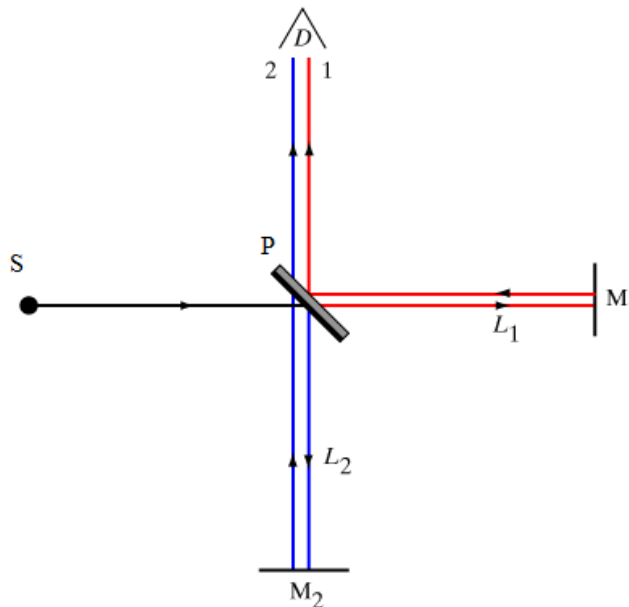


Рисунок 2.2 – Схема інтерферометра Майкельсона

Інтерферометр складається з двох дзеркал M_1 і M_2 , розташованих перпендикулярно один одному, і світлороздільної пластинки P. Пучок світла від джерела S падає на напівпрозору посріблену з одного боку роздільну пластину, де розділяється на два пучка, перший з яких, після проходження крізь пластину направляється до дзеркала M_1 , а другий після відображення від пластини – до дзеркала M_2 . Відбившись від дзеркал, хвилі йдуть назад до

пластини і після відбиття від неї першого пучка і проходження крізь неї другого поширюються в напрямку D, накладаючись один на одного. Таким чином створюється інтерференційна картина.

Застосування інтерферометра Майкельсона в техніці різноманітні. Він може бути використаний для дистанційного контролю малих деформацій (відхилень від площинності) об'єкта. Такий підхід дуже зручний коли з тих чи інших причин небажано близьке розташування об'єкта та еталонної поверхні, або об'єкт сильно нагрітий, хімічно агресивний тощо.

2.1 Принцип дії Фур'є-спектрометра

Припустимо, що у нас є когерентне джерело випромінювання з певною довжиною хвилі. Коли різниця ходу двох променів, які прийшли в приймач, дорівнює $\lambda/2$ (тобто промені прийшли в протифазі) інтенсивність світла, що реєструється приймачем, близька до нуля. При переміщенні правого дзеркала інтерферометра Майкельсона різниця ходу променів змінюється, змінюється і інтенсивність світла, що реєструється приймачем. Очевидно, що інтенсивність світла максимальна, коли різниця ходу променів буде кратна довжині хвилі.

При переміщенні дзеркала з постійною швидкістю на виході приймача буде спостерігатися електричний сигнал синусоїдальної форми. Притому, період синусоїди залежить від довжини хвилі джерела, а амплітуда від інтенсивності джерела.

Якщо на вході некогерентне джерело, то кожна довжина хвилі в спектрі джерела світла буде давати свою синусоїду на виході приймача. Таким чином на виході приймача отримується складний сигнал. При виконанні над сигналом зворотнього перетворення Фур'є, отримується спектр вхідного електричного сигналу, який також є спектром випромінювання джерела (тобто інтенсивність випромінювання джерела на різних довжинах хвиль).

Нехай різниця ходу між двома інтерферуючими пучками змінюється за законом:

$$\Delta = 2vt, \quad (2.1)$$

де Δ – різниця ходу;

v – швидкість переміщення дзеркала;

t – час.

При монохроматичному освітленні інтерферометра інтенсивність світла, що потрапляє в приймач, змінюється синусоїдально: сигнал приймача промодульовано з частотою W . Частота модуляції W залежить від оптичної частоти w монохроматичного випромінювання. Вимірюючи W , можна знайти w , тобто отримати інформацію про спектр джерела. Для отримання необхідного спектрального розподілу інтенсивності випромінювання по довжинах хвиль (частотах) використовують перетворення Фур'є.

Таким чином, процес отримання спектра методом Фур'є-спектрометра зводиться до наступних етапів:

- вимір $F(\Delta)$ шляхом реєстрації сигналу як функції зміни оптичної різниці ходу;

- експериментальне визначення значення $F(0)$, тобто реєстрація сигналу в нульовій точці різниці ходу (різниця ходу в інтерферометрі буде дорівнювати нулю, якщо оптичні довжини шляху променів/світлорозділювач/дзеркало обох плечей дорівнюватимуть). Цій точці відповідає абсолютний максимум відліків $F(\Delta)$;

- обчислення зворотного перетворення Фур'є-вираз $F(\Delta) - 0,5 F(0)$.

2.2 Переваги та недоліки Фур'є-спектрометрів

Фур'є-спектрометри мають істотні перевагами в порівнянні з класичними спектрометрами.

1. Виграш Жакино. Є можливість використовувати великі тілесні кути у джерела і приймача. Таким чином через прилад проходить більше світлового

поток, отже відбувається більш повне використання аналізованого випромінювання.

2. Виграш Фелжета. У кожен момент часу реєструється весь спектр, тому в Фур'є-спектрометрах більш високе співвідношення сигнал/шум, ніж в дифракційних або призматичних приладах.

3. Відсутність обмежень в спектральному дозволі за рахунок розмірів оптичних елементів. Важко очікувати, що розміри дифракційних решіток або тим більше призм будуть більше 50 см. Таким чином, природною межею дозволу приладів, які використовують просторову дисперсію, є величина $0,02 \text{ см}^{-1}$. У той же час вже зараз налагоджений серійний промисловий випуск Фур'є-спектрометрів з дозволом до 0002 см^{-1} .

4. Оскільки Фур'є-спектрометри не вимагають дуже вузьких вхідних і вихідних щілин, вимоги до створення оптичних схем без аберацій при їх конструкції сильно знижуються. З цієї причини стає можливим створення оптичних схем з великим відношенням діаметра об'єктива до його фокусу (відносним отвором), зазвичай 1:3, що робить такі прилади більш компактними в порівнянні з щілинними [4].

До істотних переваг спектроскопії можна віднести можливість діагностики «insitu», тобто безпосередньо в «місці існування» об'єкта, безконтактно, дистанційно, без будь-якої спеціальної підготовки об'єкта. Тому вона отримала широкий розвиток.

Однак є і істотний недолік – велика механічна і оптична складність спектрометра. Для виникнення інтерференції обидва дзеркала інтерферометра повинні бути дуже точно виставлені перпендикулярно один одному. При цьому одне з дзеркал буде виконувати позовжне переміщення, але перпендикулярність повинна зберігатися з тією ж точністю. У високоякісних спектрометрах в деяких випадках для компенсації нахилу рухомого дзеркала в процесі руху за допомогою п'єзоелектричних приводів нахиляють нерухоме дзеркало. Для отримання інформації про поточний нахилі вимірюються параметри опорного променя від лазера.

2.3 Роздільна здатність Фур'є-спектрометра

Роздільна здатність, отримана в спектрі, зареєстрованому на Фур'є-спектрометрі, визначається різницею ходу Δ . Виявляється, що різниця ходу може збільшуватися до максимальної величини тільки при достатньо малому входному отворі. При кінцевому розмірі входної діафрагми після відображення від коліматора виникають пучки, непаралельні оптичній осі приладу. Через різний нахил, різниця ходу для таких пучків виявляється трохи різною, що приводить до розширення апаратної функції приладу. Щоб послабити цей ефект, доводиться зменшувати входну діафрагму. Проте, зменшення діафрагми призводить до зменшення сигналу, а отже, до погіршення відношення сигнал/шум в спектрі. На практиці часто саме мінімально можлива діафрагма і визначає спектральний дозвіл [6].

Таким чином, реальна роздільна здатність Фур'є-спектрометрів дуже часто визначається енергетичними умовами: яскравістю джерела випромінювання, світлосилою, чутливістю приймача випромінювання, тощо. В сучасних приладах високого класу, забезпечених стандартними джерелами випромінювання для вимірювання спектрів поглинання, граничний дозвіл складає близько $0,002 \text{ см}^{-1}$.

2.4 Оптична схема. Отримання та обробка інтерферограмм

Використовуючи Фур'є-спектрометр, оптичні спектри досліджуваного об'єкта отримують в дві стадії. На першій стадії фотоприймач реєструє так звану «інтерферограму». На другій, проводиться програмно-математична обробка інтерферограми, внаслідок якої з неї відновлюється спектральний склад випромінювання, або просто спектр. Оптична схема Фур'є-спектрометра зображена на рис. 2.3.

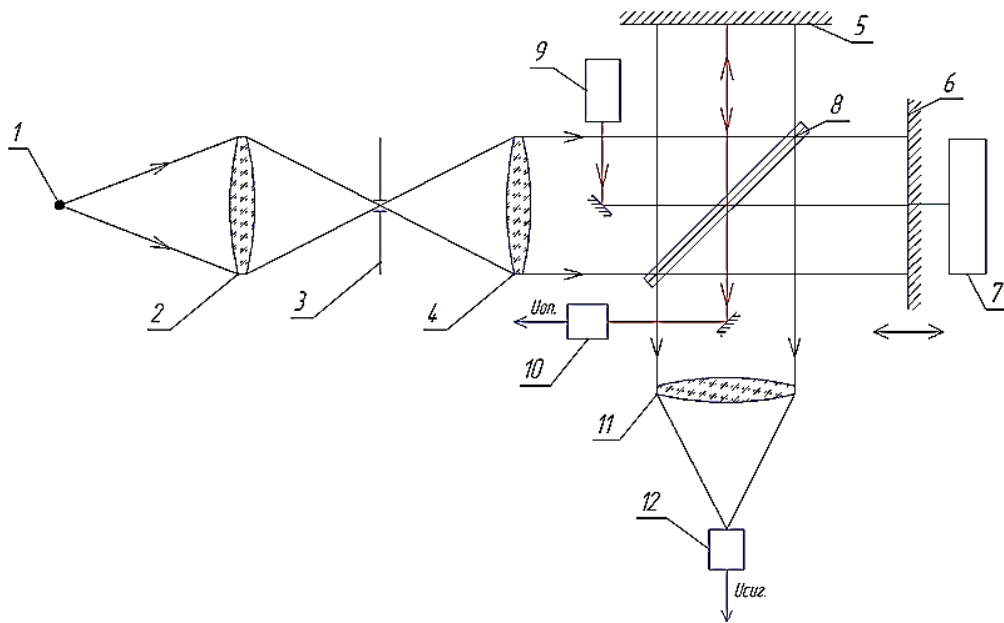


Рисунок 2.3 – Оптична схема Фур'є-спектрометра

Основні складові Фур'є-спектрометра: 1 – джерело світла, 2,4 – лінзи коліматора, 3 – вхідна діафрагма, 5 – нерухоме дзеркало, 6 – рухоме дзеркало, 7 – привід рухомого дзеркала, 8 – світлороздільна пластина, 9 – опорний (еталонний) лазер, 10 – фотоприймач опорного каналу, 11 – фокусуєча оптика, 12 – фотоприймач сигналу.

2.4.1 Отримання інтерферограмми

Основною частиною Фур'є спектрометра є інтерферометр Майкельсона. Паралельний пучок випромінювання потрапляє на напівпрозоре дзеркало – світлороздільну пластину 8, яке складає з пучком кут 45° . Частина випромінювання відбивається від світлорозділювача, інша проходить через нього уздовж променя. Хвиля, що поширюється уздовж променя, відбивається від дзеркала 5, знову потрапляє на світлорозділювач і пройшовши крізь нього, потрапляє на фотоприймач 12.

Світло, що пройшло світлорозділювач уздовж іншого променя, відбивається від плоского дзеркала 6 і, частково відбившись від світлорозділювача, також потрапляє на фотоприймач. Таким чином, на

фотоприймач потрапляють дві хвилі, отримані в результаті поділу вихідного пучка світла. Якщо виконані умови когерентності, то фотоприймач зареєструє результат їх інтерференції. Різниця фаз хвиль, що приходять $\Delta\varphi$ залежить від різниці оптичних шляхів, пройдених хвилями від точки поділу до фотоприймача, тобто від різниці ходу. Різниця ходу, в свою чергу, визначається геометрією схеми і, зокрема, залежить від положення дзеркал M_1 і M_2 .

У Фур'є-спектрометрі дзеркало інтерферометра M_2 рухається поступально і рівномірно в напрямку, зазначеному на рис. 2.3. Рух дзеркала в роботі запропоновано здійснювати за допомогою закріплення його на міні динаміку через механізм – пружинний паралелограм, і подаючи на нього струм, замінювати положення дзеркала. Різниця ходу між хвилями, що інтерферують, змінюється з часом за лінійним законом і, як наслідок, відбувається періодичне чергування інтерференційних максимумів і мінімумів, інтенсивності світла, що потрапляє на фотоприймач. Змінний сигнал, реєстрований фотоприймачем, називається інтерферограмма. Для монохроматичного світла вона має форму косинусоїди. Для використовуваного в ІЧ-спектроскопії поліхроматичного світла вона набуває більш складну форму і містить всю спектральну інформацію про падаючий на детектор пучок світла. Далі інтерферограмма перераховується шляхом перетворень Фур'є.

Для того, щоб стабілізувати швидкість руху рухомого дзеркала, і забезпечити «прив'язку» спектрометра до абсолютних значень довжин хвиль, в спектрометр вводять опорний канал, що складається з лазера (зазвичай це He-Ne лазер) і його фотоприймача (9 і 10 на рис. 2.3). Лазер в такому випадку виступає еталоном довжини хвилі. Таким чином, Фур'є-спектрометри володіють вбудованим калібруванням хвильового числа з високою точністю (практично близько $0,01 \text{ см}^{-1}$). В якості етального лазера запропоновано обрати газовий лазер ЛГН-302 (рис. 2.4). Технічні характеристики даного лазера наведені в таблиці 2.1.



Рисунок 2.4 – Газовий лазер ЛГН-302

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ЛГН-302

Технічний параметр	Значення
Робочий газ(суміш)	гелій-неон
Довжина хвилі, мкм	0,63
Потужність випромінювання, мВт	0,5
Відносна нестабільність потужності,%	1,4
Середній ресурс, год	15000
Колір випромінювання	червоний
Габарити випромінювача, мм	320×121×96
Вага приладу, кг	3,2

2.4.2 Обробка інтерферограмми

Необхідність суттєвої математичної обробки вихідних даних інтерферометра (перетворення Фур'є) для отримання спектру зробила ЕОМ невід'ємним елементом приладу. Завдяки алгоритму швидкого Фур'є-перетворення, а також розвитку обчислювальної техніки в даний час розрахунки, пов'язані з перетворенням Фур'є, можна виконувати на персональних комп'ютерах навіть для спектрів, що містять сотні тисяч точок.

Суттєвим моментом в обробці інтерферограмми є визначення положення рухомого дзеркала, що відповідає нульовій різниці ходу, якщо ми маємо справу з односторонньою інтерферограмою (хід від 0 до L). Помилка у визначенні нульової різниці ходу, що становить понад 10 % кроку (а сама величина кроку може дорівнювати часткам мікрона), викликає помітне спотворення апаратної функції, приводячи до її асиметрії, що вкрай небажано

при дослідженні форми вузьких спектральних ліній. При реєстрації двосторонніх інтерферограм (хід від $-L$ до L) цих помилок не виникає, однак такий режим вимагає більшого часу реєстрації інтерферограми і механічного переміщення дзеркала на вдвічі більшу відстань. Тому, як правило, нульову різницю ходу визначають або по інтерферометру білого світла, або з аналізу форми центральній частині інтерферограми, яка зареєстрована як одностороння (від 0 до L), але з невеликим захопленням негативних зсувів рухомого дзеркала [8].

Принциповою відмінністю Фур'є-спектроскопії від традиційної спектроскопії є те, що Фур'є-спектрометр реєструє відразу весь спектр досліджуваного сигналу, а не його маленьку ділянку, як звичайний дисперсійний спектрометр (з призмою або дифракційною решіткою). Відповідно, на порядки зростають обсяг одержуваної в одиницю часу інформації і роздільна здатність апаратури. Сучасні Фур'є-спектрометри дозволяють працювати в широкому спектральному діапазоні – від субміліметрового до ультрафіолетового. Спектральний дозвіл таких приладів досягає 10^{-3} см^{-1} [9].

2.5 Основні оптичні елементи пристрою

2.5.1 Оптичні матеріали

Оптичні елементи інфрачервоного спектрометра (фокусуєчі лінзи, світлорозділювач) повинні бути прозорі для ІЧ-випромінювання. Оскільки найбільш поширений і дешевий матеріал – звичайне оптичне скло різних марок – прозорий лише в обмеженому спектральному діапазоні (приблизно до 2 мкм), в більшості, доводиться використовувати більш дорогі спеціальні скла, кристали і різні сполуки.

Параметри матеріалів, що використовуються в якості основи світлороздільної пластин, лінз коліматорів і робочих вікон джерел, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Властивості деяких оптичних матеріалів, що застосовуються в ІЧ області спектра

Матеріал	Область прозорості, мкм	Показник заломлення
LiF	0,11 – 7,0	1,39
Флюорит CaF ₂	0,12 – 9,0	1,4
BaF ₂	0,14 – 12,0	1,45
NaCl	0,2 – 16,0	1,52
KBr	0,21 – 25,0	1,53
ZnSe	0,5 – 20	2,42
KRS-5, (TlBr/I)	0,55 – 35,0	2,38
Поліетилен високої щільності	20,0 – 200,0	1,52

В якості лінз коліматорів, фокуруючої оптики (поз. 2, 4, 11 на рис. 2.3) запропоновано обрати оптичні деталі з матеріалу ZnSe з широкосмуговим просвітлюючим покриттям нанесених на обидві поверхні. Коефіцієнт відбиття покриття при цьому буде складати менше 1 % (рис. 2.5).

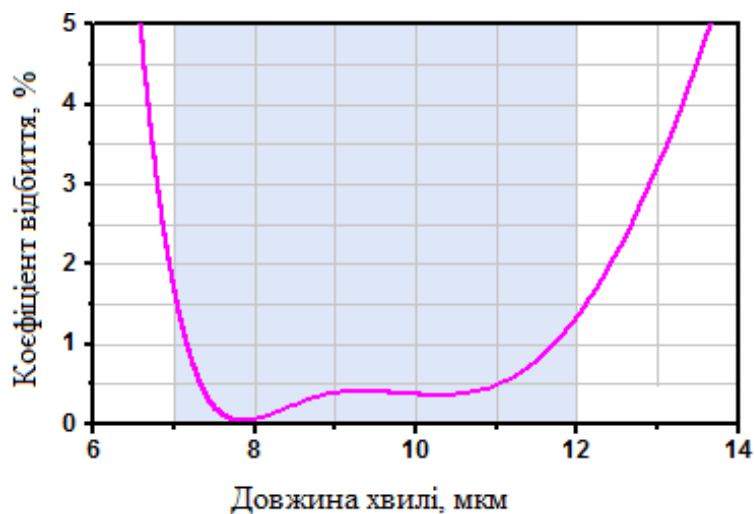


Рисунок 2.5 – Графік залежності коефіцієнту відбиття від довжини хвилі

Це покриття значно знижує високу відбивну здатність матеріалу лінзи, що відповідає передачі понад 97 % у всьому діапазоні покриття AP, показником заломлення 2,42, та областю прозорості від 0,6 мкм до 16,0 мкм.

2.5.2 Світлорозділювач

Світлорозділювач є не тільки основним, але і самим «вразливим» елементом Фур'є-спектрометра. У далекій ІЧ-області в якості основи світлорозділювача використовуються плівки з поліетилену або лавсану ($n = 1,85$). В області від 200 см^{-1} до $7\,000 \text{ см}^{-1}$ зазвичай застосовують пластини з різних прозорих в цій області матеріалів (CsI, KBr та інших), що покриті багатошаровим інтерференційним покриттям з ІЧ-прозорих матеріалів. В області від $2\,000 \text{ см}^{-1}$ до $16\,000 \text{ см}^{-1}$ кращими є світлорозділювачі з кварцу або фториду кальція з покриттям з кремнію ($n = 3,4$) або оксиду заліза III ($N = 3,0$). Так як в класичній схемі випромінювання падає на світлорозділювач під кутом 45° , початково природне світло стає частково поляризованим після проходження світлорозділювач. При цьому s-поляризований пучок, в якому вектор напруженості електричного поля перпендикулярний площині падіння (площині оптичної схеми інтерферометра), набагато інтенсивніше, ніж р-поляризований пучок, в якому електричне поле лежить в площині падіння. Різниця в інтенсивності поляризованих пучків збільшується зі зменшенням показника заломлення світлорозділювача. Уникнути поляризуючої дії світлорозділювача можна шляхом спеціальної конструкції інтерферометра, наприклад, встановити кут падіння пучка на світлорозділювач 20° , що зменшує поляризаційні ефекти до малої величини.

В якості світлорозділювача запропоновано обрати пластину BSW29R фірми Thorlabs з наступними параметрами: матеріал пластини – кремній з діапазоном просвітлюючого покриття на довжини хвиль від 600 нм до 1700 нм , орієнтовано до падаючого променя під кутом 45° . Графіки залежності коефіцієнтів пропускання і відображення від довжини хвилі ($600 - 1700 \text{ нм}$), зображено на рис. 2.6.

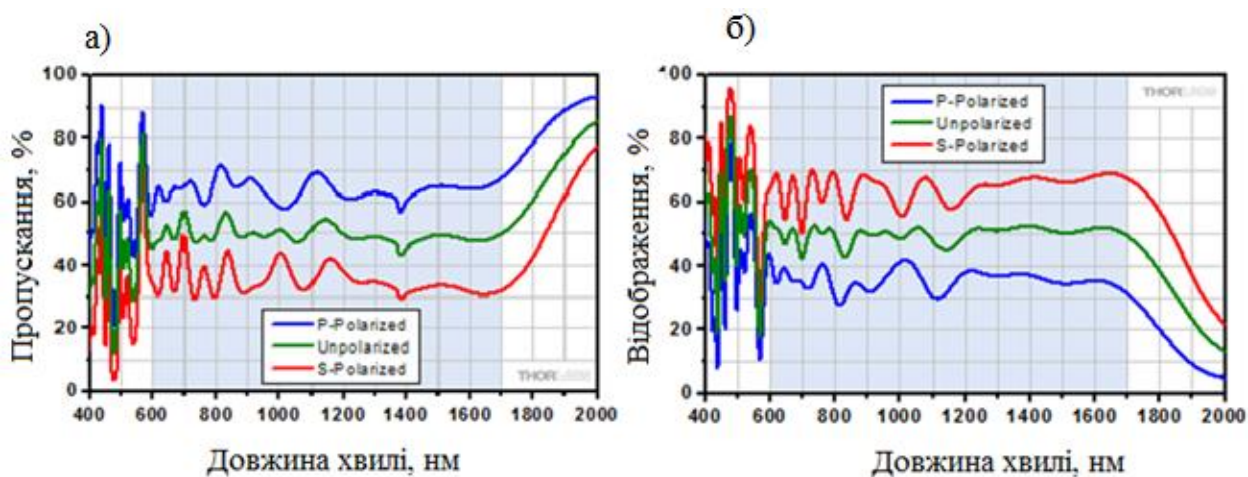


Рисунок 2.6 – Графіки залежності коефіцієнтів пропускання (а) і відображення (б) від довжини хвилі

Для розподілу вихідного променя може також служити світлорозділюючий кубик (рис. 2.7), виконаний у вигляді двох ідентичних діелектричних призм, суміщених гіпотенузами, що являє собою «товсту» плоскопаралельну пластину.

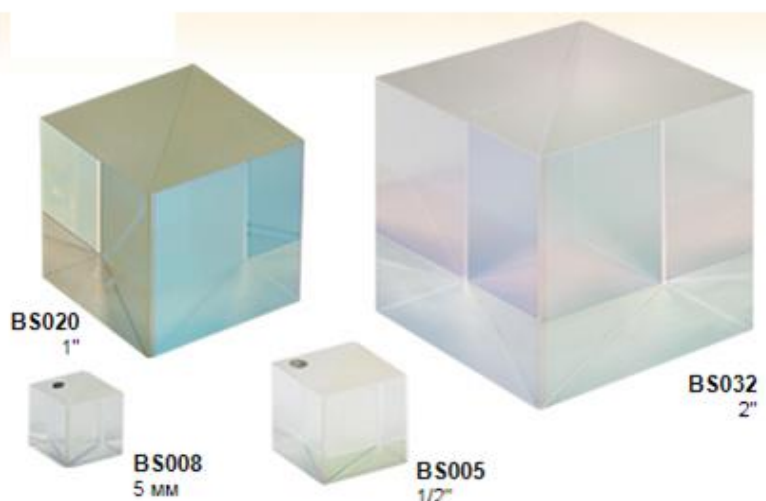


Рисунок 2.7 – Приклади можливих світлорозділюючих кубиків

Залежність коефіцієнту пропускання від довжини хвилі для такого кубика зображено на рис. 2.8.

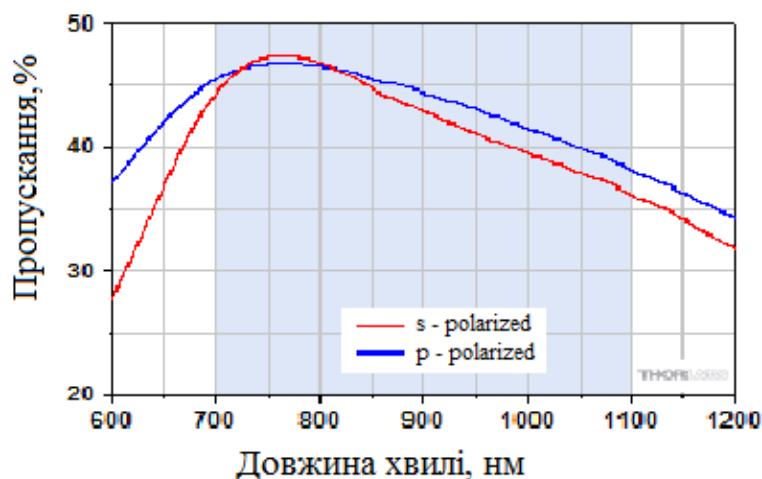


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнту пропускання від довжини хвилі для світлороздільного кубика

Перед світлороздільною пластиною кубик має наступні недоліки: він не дає можливість здійснити фокусування випромінювання і вимагає застосування додаткових фокуруючих пристроїв, що ускладнює конструкцію в цілому, збільшує габарити пристрою, що призводить до зниження ефективності використання випромінювання за рахунок втрат як в фокуруючих додаткових пристроях (лінзах), так і за рахунок перевідбиттів на межі скло – повітря. Також використання кубика затрудняє юстування всього приладу, за рахунок перевідбиттів на його гранях.

2.5.3 Дзеркала

Призначення оптичної системи – направляти випромінювання джерела по потрібному шляху з мінімальними втратами. Важлива особливість дзеркала спектрометра – дзеркальне покриття повинне бути спереду дзеркала, що дозволяє уникнути хроматичної аберації, і для того, щоб інтерференційні лінії не були кривими, поверхня дзеркала повинна бути досить якісною [10].

В Фур'є-спектрометрі пропонується використання відбивних дзеркал із зовнішнім покриттям (напилений алюміній, просвітлююче покриття). Такі

дзеркала мають середній коефіцієнт відбиття понад 90 %, в спектральному діапазоні від 450 нм до 2 мкм, і більше 95 % в діапазоні від 2 мкм до 20 мкм. Відбивна оптика може мати плоскі, сферичні, параболічні, еліптичні або тороїдальні поверхні (рис. 2.9). Розроблено велику кількість типів оптичних систем спектрофотометрів.

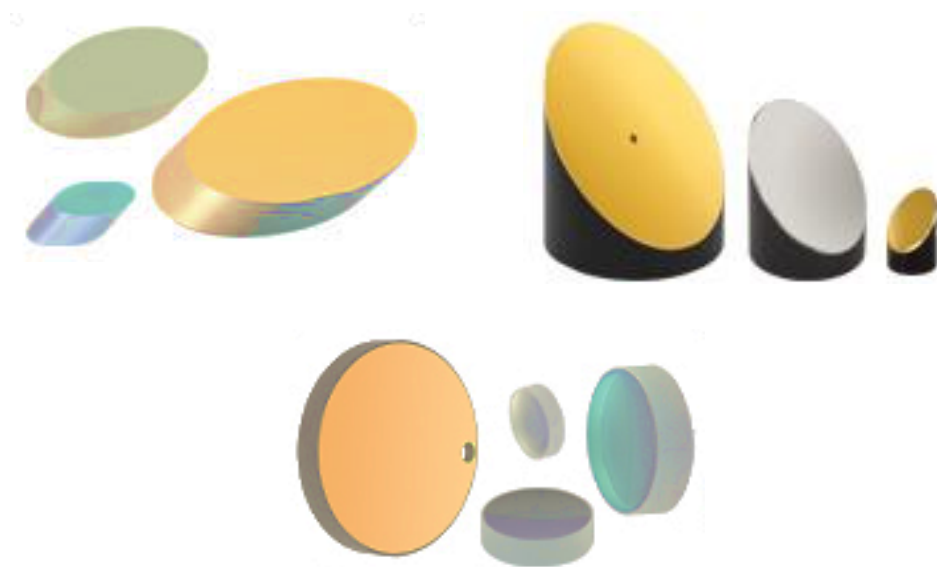


Рисунок 2.9 – Приклади відбивних дзеркал з різними поверхнями

2.5.4 Приймачі випромінювання

Фотоприймач – це пристрій, що перетворює енергію випромінювання в електричний сигнал. Фотоприймачі характеризуються великою кількістю параметрів, основними з яких є чутливість і спектральний діапазон. Однак застосування фотоприймачів в Фур'є-спектроскопії накладає на них певні вимоги, які, як правило, не розглядаються при аналізі фотоприймачів в «класичних» щілинних скануючих по хвильовим числам приладах. Тому спочатку розглянемо специфічні вимоги до приймачів Фур'є-спектрометрів.

В Фур'є-спектрометрах, на відміну від ґраткових і призмних спектрометрів, на приймач потрапляє відразу все випромінювання джерела, а

оптичний спектр відновлюється Фур'є-перетворенням зареєстрованого сигналу. Тому фотоприймач повинен відповідати таким вимогам:

- великий динамічний діапазон. В сучасних Фур'є-спектрометрах динамічний діапазон інтерферограми досягає 10^6 ;
- висока лінійність, в тому числі при великих сигналах;
- спектральна широкосмуговість та швидкодія. Якщо спектральний діапазон детектора вужче, ніж цікавить спектр, то доводиться реєструвати спектр кілька разів з різними фотоприймачами. В Фур'є-спектрометрі немає фіксованої частоти модуляції, частотний діапазон вихідного сигналу пропорційний ширині досліджуваного спектра. Саме для узгодження з частотними параметрами детекторів сучасні Фур'є-спектрометри мають широкий діапазон швидкостей сканування. Швидкість переміщення рухомого дзеркала вибирається такою, щоб інтервал частот модуляції ділянок спектру, що цікавлять, потрапив в область оптимальної чутливості детектора.

Приймачі випромінювання можна розділити на дві групи: теплові та фотоелектронні. Чутливий елемент теплових приймачів реагує на кількість енергії, витраченої на його нагрівання випромінюванням. Теплові фотоприймачі є неселективними, тобто вони однаково чутливі в широкому діапазоні довжин хвиль. Відгук фотоелектронних приймачів виникає завдяки взаємодії падаючого випромінювання з електронною підсистемою матеріалу. Їм властива неоднакова чутливість до випромінювання різних довжин хвиль. Найбільш поширеними тепловими фотоприймачами інфрачервоного діапазону є болометри, пневматичні приймачі і піроелектричні приймачі, а фотоелектронними – фотодіоди і фоторезистори. В основі роботи фотоелектронних напівпровідникових приймачів, лежить явище внутрішнього фотоефекту.

В даний час в ближньому ІЧ-діапазоні найбільш поширені фотодіоди на основі германію (Ge), твердого розчину арсенід галію-індію (InGaAs), та кремнію (Si), що здатний приймати випромінювання тільки в діапазоні довжин хвиль від 400 нм до 1100 нм, а так як лінії поглинання різних речовин або

спектри випромінювання джерел світла лежать далі, то для їх виявлення потрібен інший діод. Спектральні характеристики найпоширеніших фотодіодів наведені на рис. 2.10.

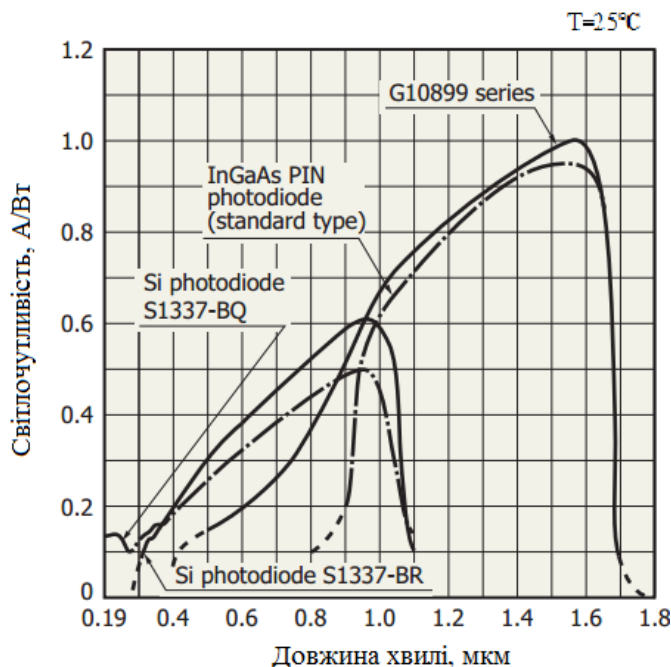


Рисунок 2.10 – Спектральна відповідність діодів різного типу

В середньому ІЧ-діапазоні використовуються охолоджувані рідким азотом фотодіоди на основі твердого розчину HgCdTe (скорочено по-українськи КРТ – кадмій-ртуть-телур). Широко застосовуються детектори на основі антимонід індію (InSb), що мають кращі, в порівнянні з КРТ, шумові характеристики, але більш вузький спектральний діапазон [11]. Для запропонованого приладу найбільш підходять германієві фотодіоди, здатні приймати випромінювання в діапазоні від 600 нм до 1700 нм.

На сьогоднішній день розроблено серію G10899 PIN-фотодіодів на основі InGaAs (рис. 2.11). Особливостями його є: широкий спектральний діапазон чутливості (від 0,5 мкм до 1,7 мкм), низький рівень шуму, низький темновий струм, велика активна зона. Технічні характеристики фотодіодів G10899 наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики фотодіодів G10899 при $T=25^{\circ}\text{C}$

Тип		G10899-003 К	G10899-005 К	G10899-01 К	G10899-02 К	G10899-03 К		
Спектральний діапазон, λ , мкм		0,5 – 1,7						
Максимальна довжина хвилі чутливості, λ_p , мкм		1,55						
Світлочутливість, S	$\lambda = 0,65$ мкм	мін., (A / B)		0,15				
		тип., (A / B)		0,22				
	$\lambda = 0,85$ мкм	мін., (A / B)		0,35				
		тип., (A / B)		0,45				
	$\lambda = 1,3$ мкм	мін., (A / B)		0,5				
		тип., (A / B)		0,9				
	$\lambda = \lambda_p$	мін., (A / B)		0,85				
		тип., (A / B)		1				
Темновий струм, нА		тип., нА		0,3	0,5	1	5	15
		макс., нА		1,5	2,5	5	25	75

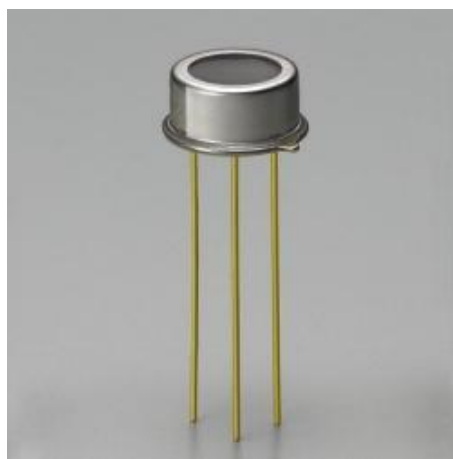


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд фотодіода G10899-03К

2.6 Механічні вузли та електронна система пристрою

Основною задачею при юстируванні пристрою даної роботи є налаштування паралельності дзеркал інтерферометра Майкельсона. Нерухоме дзеркало кріпиться на тримач з мікрометричними гвинтами для повороту в

двох координатах. На рис. 2.12 зображено ескіз механічної системи юстирування дзеркала у просторі.

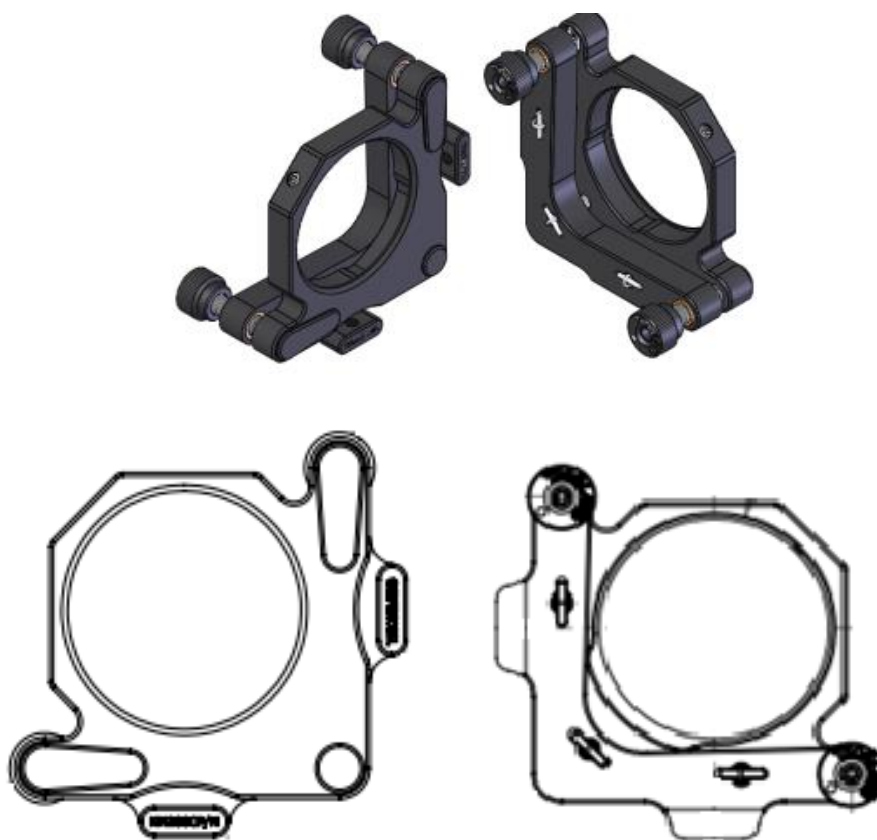


Рисунок 2.12 – Ескіз механічної частини пристрою для юстирування нерухомого дзеркала

Рухоме дзеркало кріпиться до направляючого стрижня пружинного паралелограма, рух якого відбувається за рахунок подачі сигналу на динамік [10]. Систему кріплення рухомого дзеркала зображено на рис. 2.13.

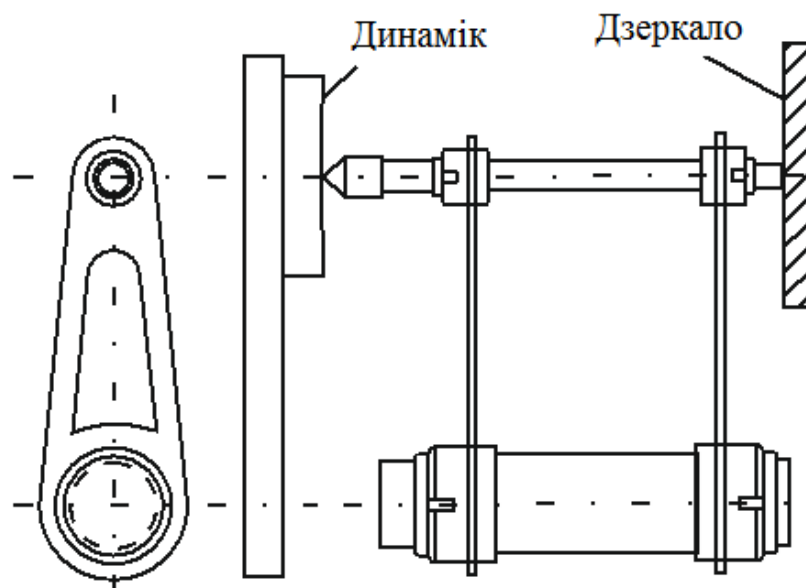


Рисунок 2.13 – Ескіз системи кріплення рухомого дзеркала

Рухоме дзеркало до стрижня кріпиться максимально перпендикулярно його осі. Так як в конструкції використовується світлорозділювальна пластина, то налаштування інтерферометра можливо здійснити одним дзеркалом, в нашому випадку нерухомим, система настройки зображена на рис. 2.12.

Таким чином, на даному етапі атестаційної роботи, було запропоновано оптичну схему Фур'є-спектрометра, вивчено принцип його роботи, переваги та недоліки. Особливу увагу приділено підбору основних оптичних, оптико-механічних елементів, з обґрунтуванням їх вибору та конструктивним особливостям пристрою.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРА

3.1 Моделювання роботи інтерферометра Майкельсона

Основним елементом Фур'є-спектрометра являється інтерферометр Майкельсона. Тому в пакеті програм Zemax розроблена комп'ютерна модель інтерферометра Майкельсона, саме з тих оптичних елементів, що були підібрані раніше.

Необхідний режим роботи програмного пакета – «Non-SequentialMode» (не послідовний режим постановки компонентів) [12]. Задані параметри для моделювання інтерферометра Майкельсона приведені додатку А. Отримане двомірне зображення схеми інтерферометра Майкельсона, побудованої по заданих параметрах (Analysis – Layout – NSC 3DLayout) наведено на рис. 3.1.

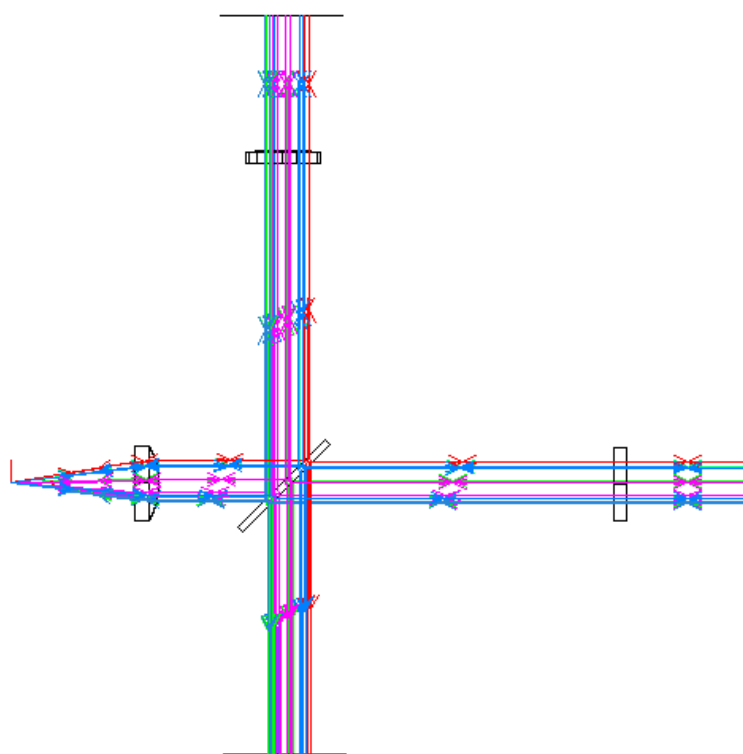


Рисунок 3.1 – Двомірне зображення схеми інтерферометра Майкельсона

Наступний етап – аналіз ходу променів в інтерферометрі Майкельсона: Analysis – Detectors – Ray Trace/Detector Control. Далі – очищення детекторів

(ClearDetectors) і отримання зображення інтерференційної картини на детекторі (рис 3.2).

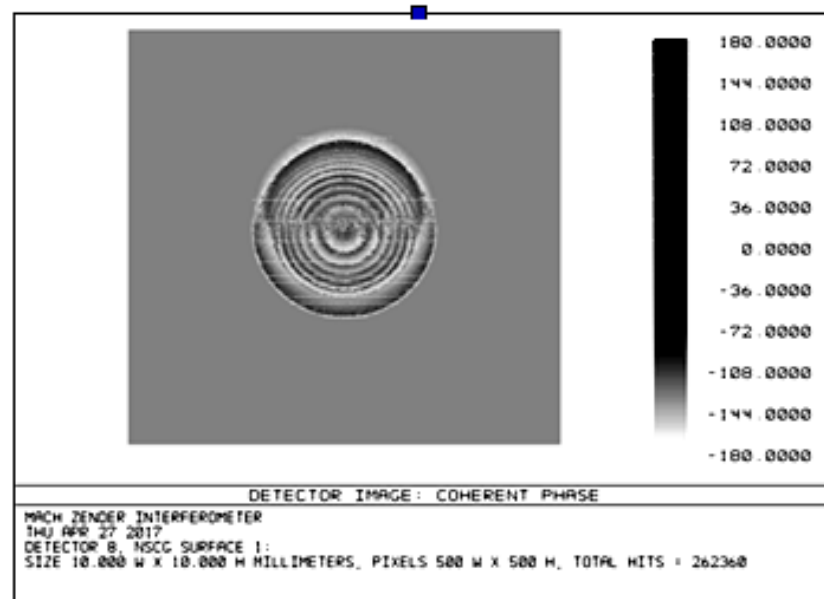


Рисунок 3.2 – Інтерференційна картина

Моделювання дозволяє визначити конструктивні параметри експериментальної установки, а також отримати інформацію про видність інтерференційної картини при різних положеннях елементів установки.

3.2 Математичне забезпечення Фур'є-спектрометра

Без математичної обробки Фур'є-спектрометр неможливий – саме на комп'ютері проводиться зворотне Фур'є-перетворення, що перетворює інтерферограму, отриману від спектрометра, в спектр вхідного сигналу.

Рух дзеркала в інтерферометрі здійснюється за допомогою прецизійного механізму (див. рис. 2.13. Точне положення дзеркала (різниця ходу в інтерферометрі) визначається за допомогою референтного каналу. Нульове значення різниці ходу (основний максимум інтерферограми) визначається розрахунковим шляхом [13].

Управління процесом вимірювання здійснюється за допомогою програмного комплексу. Одним із таких програмних комплексів може бути – OPUS – це всеосяжний пакет програм, призначений для найбільш повного використання всіх можливостей Фур'є-спектрометра. Вибір джерел, оптичних фільтрів, каналів зразка і детекторів здійснюється з програмного комплексу OPUS без порушення вакууму в спектрометрі. Програмованим чином здійснюється настройка приладу, оптимізація його параметрів, управління його роботою, здійснення Фур'є-перетворення інтерферограми, обробка вихідної інформації, в тому числі побудова градуовальних графіків, друк результатів і збереження результатів аналізу. Програмний комплекс OPUS забезпечує обмін (пересилання) вимірювальної інформації в інші програми для підготовки документів з результатами вимірів.

Спочатку на вхід інтерферометра потрапляє монохроматичне випромінювання частоти ω . Нехай хвилі, що приходять на фотоприймач уздовж променів, мають однакову інтенсивність $I_0/2$. Інтенсивність світла, що реєструється фотоприймачем $I_{\phi\Pi}$, при цьому дорівнює:

$$I_{\phi\Pi} = I_0 + I_0 \cdot \cos \Delta\varphi . \quad (3.1)$$

Нехай в початковий момент часу дзеркала M_1 і M_2 , (рис. 2.3, поз. 5,6) встановлені так, що різниця ходу, а значить і величина $\Delta\varphi$, дорівнює нулю. При русі дзеркала з постійною швидкістю V оптична різниця ходу $\Delta = 2Vt$ і, отже, різниця фаз $\Delta\varphi$ хвиль змінюється з часом за лінійним законом:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta = \frac{2\pi}{cT} \cdot 2vt = \omega\tau , \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{2v}{c} \cdot t , \quad (3.3)$$

де c – фазова швидкість світла, а пропорційна часу змінна τ введена для спрощення виду запису.

Як уже зазначалося, інтерферограмою називається тільки змінна складова інтенсивності світла, що потрапляє на фотоприймач. Її можна уявити у вигляді залежності від часу в такий спосіб:

$$I(\tau) = I_0 \cos(\omega\tau) . \quad (3.4)$$

Якщо аналізоване випромінювання містить дві монохроматичні компоненти, то інтерферограма буде сумою двох складових:

$$I(\tau) = I_1 \cos(\omega_1\tau) + I_2 \cos(\omega_2\tau) , \quad (3.5)$$

де I_1 , I_2 – інтенсивності монохроматичних складових випромінювання з частотами ω_1 і ω_2 відповідно.

Продовживши аналогічний аналіз, неважко зрозуміти, що в тому випадку, коли спектр аналізованого випромінювання являє собою безперервний набір монохроматичних складових, кожна з яких має відповідну інтенсивність $I(\omega)$, то інтерферограма буде відповідати інтегралу виду:

$$F(\tau) = \int_0^{\infty} I(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega . \quad (3.6)$$

Ця реєструюча приладом функція часу (інтерферограма) є перетворенням Фур'є аналізованого оптичного спектру випромінювання $I(\omega)$. На рис. 3.3 наведено теоретичну інтерферограму, сигнал якої, після обробки, відповідає довжині хвилі 532 нм. Інтерферограму промодулювано в пакеті MatLab [14].

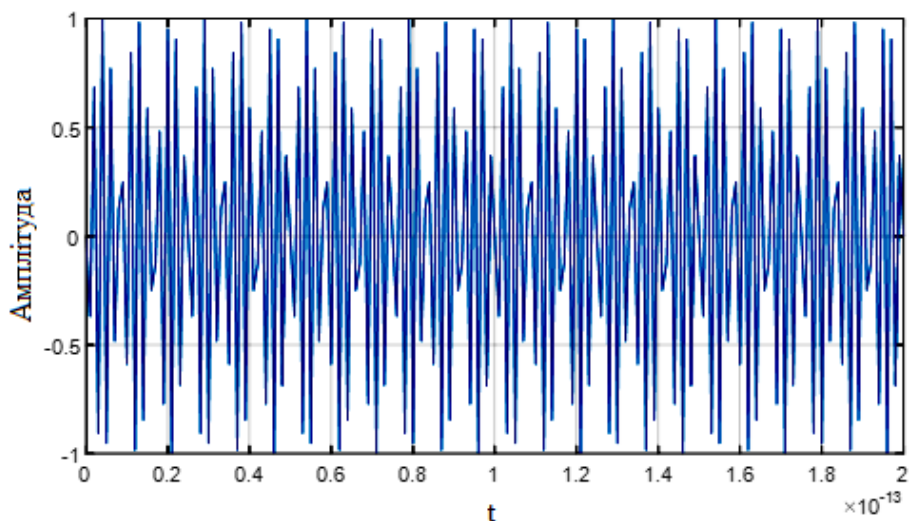


Рисунок 3.3 – Інтерферограма основного каналу

Пристрій, запропонований в даній роботі, працює за допомогою вузла руху дзеркала, який в свою чергу здійснюється за допомогою динаміка (рис. 2.13). Для реалізації програмної частини пристрою, який працює за допомогою звукової карти, накладаються вимоги, а саме: програмно можливо обробити сигнал частотою від 20 Гц до 25 Гц, тому інтерферограму потрібно промодулювати по сигналу від 20 Гц до 25 Гц [15]. На рис. 3.4, 3.5 зображено інтерферограми промодульовані по частоті 20 Гц.

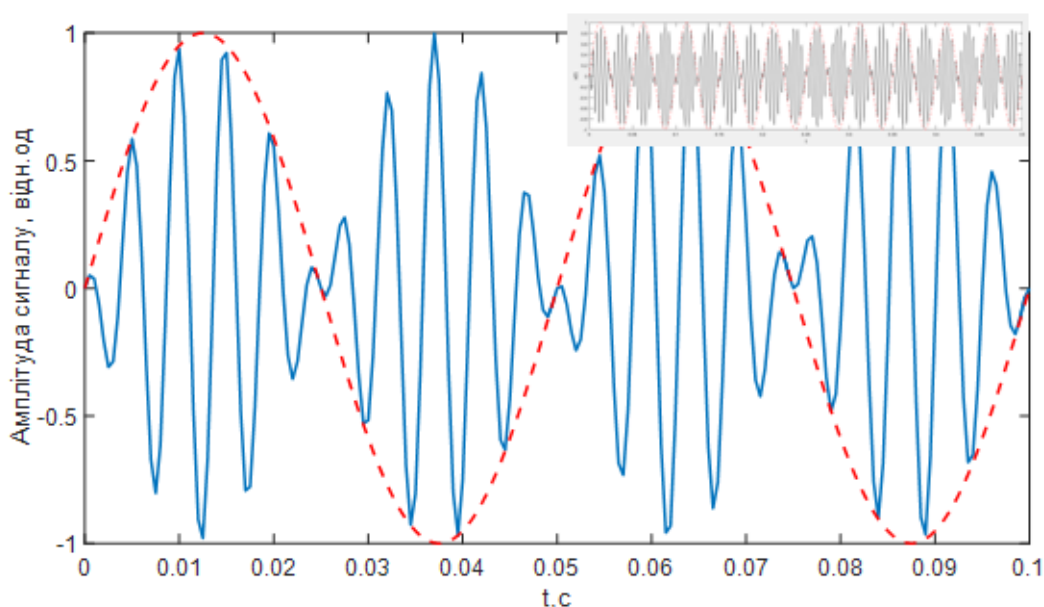


Рисунок 3.4 – Інтерферограма опорного каналу (довжина хвилі 632 нм)

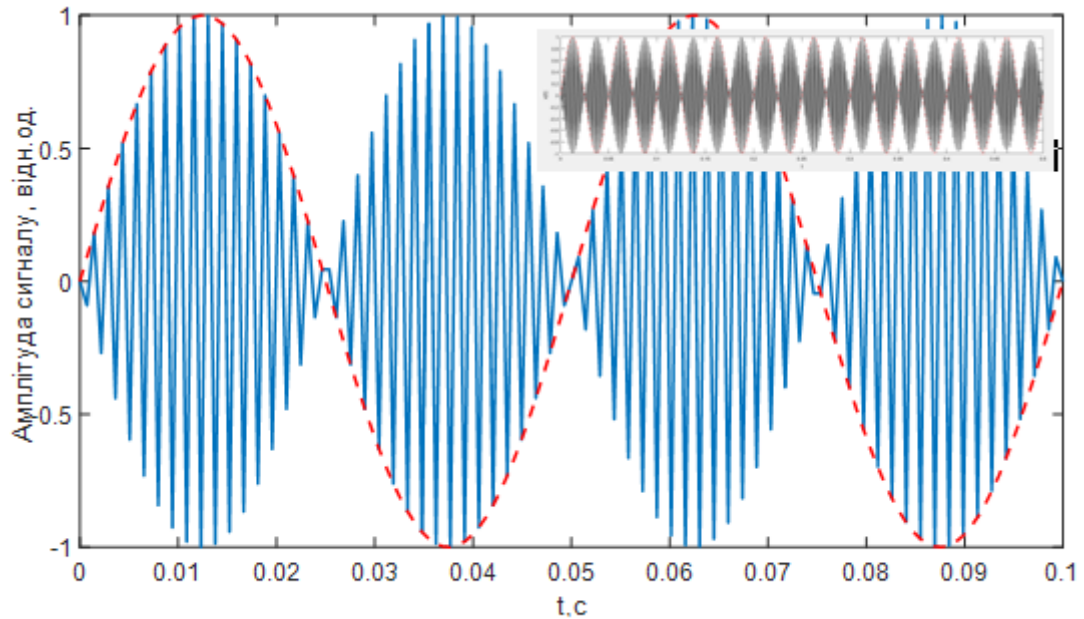


Рисунок 3.5 – Інтерферограма досліджуваного каналу (532 нм)

Після порівняльного програмного аналізу сигналів, виконується перехід до отримання частотних характеристик шляхом зворотного перетворення Фур'є – і це становить другий етап отримання шуканого спектру [16]:

$$I(\omega) = (\pi)^{-1} \int_0^{\infty} F(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau . \quad (3.7)$$

Швидке виконання такої математичної процедури чисельними методами стало можливим лише після появи досить потужної обчислювальної техніки, що і дозволило реалізувати метод Фур'є-спектроскопії в практиці сучасного експерименту. Результат перетворення приведено на рис. 3.6.

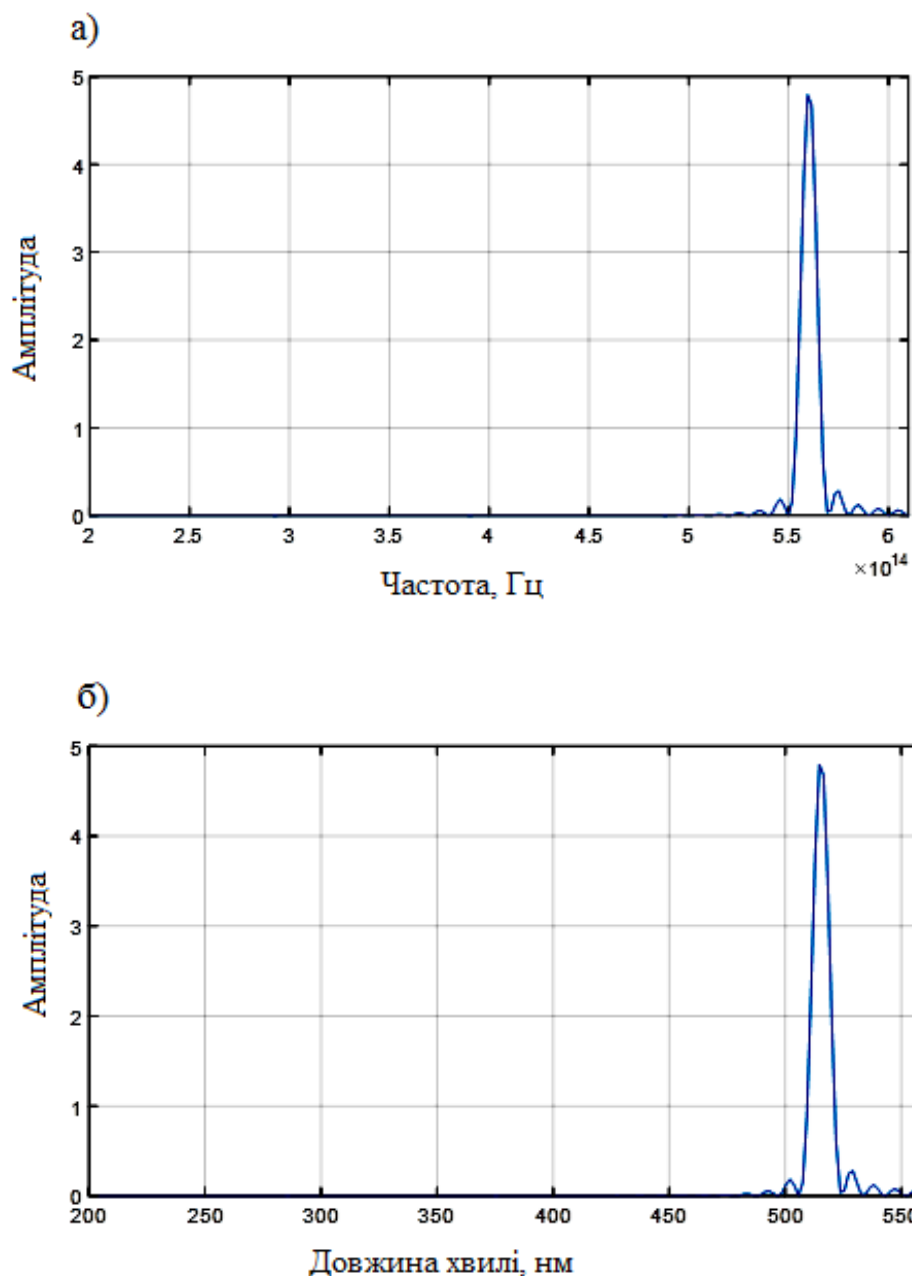


Рисунок 3.6 – Спектр сигналу через частоту (а), через довжину хвилі (б)

На даному рисунку зображено спектр джерела випромінювання з центральною довжиною хвилі 532 нм. Графіки було отримано теоретичним шляхом при ідеальних умовах: відсутність шумів або засвітління іншими джерелами випромінювання та ідеальним розподілом пучка досліджуваного джерела. На даному етапі роботи, теоретична модель приладу працює, і має ряд переваг над існуючими аналогами: простота конструкції, невисока

собівартість пристрою, що становить 5000 доларів США, в той час як існуючі аналізатори спектрів джерел випромінювання, коштують від 10 000 до 50 000 доларів США. Отже, данні та результати роботи можна втілювати для розробки дослідного зразку аналізатору спектрів як джерел випромінювання так і речовин.

Таким чином, використовуючи результати даної роботи, а саме комп'ютерного моделювання, можна промоделювати і віртуально від'юстувати експериментальний зразок Фур'є-спектрометра, будучи впевненим, що його реальні параметри будуть мати мінімальні розбіжності з розрахунковими.

ВИСНОВКИ

При розробці фотонних приладів, є необхідними прилади для вивчення і контролю спектрального складу джерел випромінювання. Вони призначені для вивчення спектрального складу матеріалу і спектрального складу безперервних і імпульсних джерел світла.

Основними завданнями атестаційної роботи було: розробка та моделювання оптичної схеми Фур'є-спектрометра для дослідження спектральних характеристик джерел випромінювання.

Для виконання основного завдання роботи були виконані задачі:

– в першій частині роботи, було розглянуто та проаналізовано існуючі оптичні спектрометри, котрі відрізняються принципом дії, конструкцією та призначенням. Розглянуто їх різні конструкції, котрі мають попит на сьогоднішній день;

– в другій частині роботи були запропоновані основні оптичні елементи, з обґрунтуванням їх вибору, особливу увагу приділено конструктивним особливостям пристрою та його головних оптико-механічних елементів.

– третя частина роботи містить результати комп'ютерного моделювання схеми інтерферометра Майкельсона та обробки інтерферограмм, за допомогою сучасних математичних методів та пакетів розрахунків.

Данна теоретична модель приладу працює і має ряд переваг над існуючими аналогами: простота конструкції, невисока собівартість пристрою. Існуючі аналоги аналізаторів спектрів джерел випромінювання коштують в рази більше.

Отже отримані результати роботи можуть бути використані при виготовленні дослідного зразку Фур'є спектрометра, основним призначенням якого є спектрального аналіз речовин та джерел випромінювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зеленський С.Є., Охріменко Б.А. Лазерна спектроскопія: навчальний посібник для фізичних спеціальностей класичних університетів, 2019. 454 с.
2. Demtroder W. Laser Spectroscopy. Basic Concepts and Instrumentation. Third Edition. Springer, 2003. P. 476–489.
3. Eichler H.J., Eichler J., Lux O. Lasers. Basics, Advances and Applications. Springer Nature Switzerland, 2018. 511p.
4. Eichler H.J., Eichler J. Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen / Hans Joachim Eichler, Jürgen Eichler. 8th ed. Springer, 2015. 488 p.
5. Demtroder W. Laser Spectroscopy. Basic Concepts and Instrumentation. Third Edition. Springer, 2003. P. 396–416.
6. Demtroder W. Laser Spectroscopy. Vol. 1. Basic Principles. Vol. 2. Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. Vol. 1. 697 p. Vol. 2. 457 p.
7. Bass M. Handbook of Optic. Vol. II. Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry. 3d ed. McGraw Hill, 2009. 1264 p.
8. Holmes G., Lindon J. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. Vol. 1–3. Third Edition. Tranter: Elsevier, 2000. 2581 p.
9. Ficek Z., Swain S. Quantum Interference and Coherence: theory and Experiments. New York: Springer Science & Business Media, 2005. 418 p.
10. Khurgin J.B., Tucker R.S. Low Light. Science and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 388 p.
11. МАЧЕХІН, Ю. П.; ГНАТЕНКО, О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання. 2021.
12. Бітюков А. Ю., Гнатенко О. С. Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем: матеріали 23 Міжнародного молодіжного форуму. Т. 1. Харків: ХНУРЕ. 2019. С. 248–249.
13. Rand S.C. Lectures on Light. Nonlinear and Quantum Optics using the Density Matrix. New York: Oxford University Press Inc. 2010. 304 p.

14. Parson W.W. Modern Optical Spectroscopy. With Examples from Biophysics and Biochemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. 512 p.

15. MATLAB Documentation. Signal Processing Toolbox [electronic version] / The MathWorks. Inc., 2007.

16. MATLAB Documentation. Wavelet Toolbox. Advanced Concepts [electronic version] / The MathWorks. Inc., 2007.